



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی اکتشاف معدن

مدل سازی راندمان حفاری چاه های نفت و گاز

با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره

بورگوین - یانگ

دانشجو:

احسان عرب یارمحمدی

استاد راهنما:

دکتر علی مرادزاده

اساتید مشاور:

دکتر رضا شادی زاده

مهندس مهدی زعفرانیه

بهار ۱۳۸۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به:

کسانی که معنای عشق، محبت و از خود گذشتگی را در وجود آنها یافتم؛

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

هنگامی که این سطرها را می‌نویسم، سالهای زیادی است که از حضور من در این دانشگاه به عنوان دانشجوی کارشناسی و کارشناسی ارشد می‌گذرد. این سالها خاطرات تلخ و شیرین زیادی را برای من رقم زده است؛ اما مهمترین دستاورد آن، تجربیاتی است که از این رهگذر عاید شده است و می‌تواند به مثابه دستمایه‌ای ارزشمند برای ادامه‌ی هر چه بهتر حیات دنیوی و انشاءالله رستگاری اخروی باشد. خداوند عالم را شاکرم که در این مسیر پرفراز و نشیب لحظه‌ای تنهایی نگذاشت و انسان‌های شایسته‌ای را برایم، واسطه‌ی خیر و راهنمای حرکت در مسیر درست و نجات از کج‌روی‌ها قرار داد. از همه‌ی آنها سپاسگزارم.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم، از زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه‌ی آقای دکتر علی مرادزاده به عنوان استاد راهنما بی‌نهایت تشکر نمایم. از خداوند متعال برای ایشان سلامتی و توفیق در زندگی را مسئلت می‌نمایم. همچنین مراتب تشکر و قدردانی خود را خدمت آقایان دکتر رضا شادی‌زاده و مهندس مهدی زعفرانیه که زحمت مشاوره‌ی پایان‌نامه را عهده‌دار بودند و زمینه‌ی در اختیار گذاشتن داده‌های لازم را فراهم نمودند، ابراز می‌دارم.

از کلیه اساتید دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک که افتخار شاگردی اغلب آنها را داشتم، علی‌الخصوص آقایان دکتر رضا خالوکاکائی - ریاست محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک - و دکتر فرامرز دولتی اردجانی - مدیر محترم گروه اکتشاف - که زحمت داوری این پایان‌نامه را نیز به عهده داشتند، سپاسگزاری فراوان می‌نمایم.

از همه‌ی دوستانی که در طی این سالها مرا از لطف و عنایت خود بی‌بهره نگذاشتند، خصوصاً آقایان حسین شاه‌حسینی، علی‌رضا ترابی، مهندس علی‌رضا عرب‌امیری، مهندس کاوه طالبی، مهندس نادر زیاری، مهندس حمید سرخیل، مهندس محسن حاج‌حسینی و دوست عزیزم مهندس هادی بیاری تشکر می‌نمایم و از خداوند منان توفیق روزافزون برایشان خواستارم.

در پایان از دوست خوبم آقای مهندس رضا روکی که در انجام این پایان‌نامه از هیچ‌گونه کمک و مساعدتی دریغ نورزیدند صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایم و برای ایشان آرزوی موفقیت دارم.

چکیده

نرخ نفوذ مته‌ی حفاری یا به بیان دیگر نرخ حفاری، یکی از مهمترین پارامترها در بررسی راندمان حفاری چاه‌های نفت و گاز محسوب می‌شود و عبارت است از: میزان پیشروی مته‌ی حفاری در سنگ‌ها و سازندهای تحت حفاری در واحد زمان. از آنجایی که عملیات حفاری، سهم قابل توجهی از هزینه‌های اکتشاف و بهره‌برداری مواد هیدروکربوری را به خود اختصاص می‌دهد، به دست آوردن مدلی که بتواند ارتباط بین نرخ نفوذ و سایر پارامترهای دخیل در حفاری همچون سرعت دوران مته، بار روی مته، نوع و وزن گل حفاری و جنس سازندها را بیان کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌های ریاضی خطی و غیرخطی بسیاری در همین راستا ارائه شده‌اند که هرکدام تا اندازه‌ای در بیان ارتباط نرخ نفوذ با سایر پارامترها موفق بوده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر نیز از دو روش رگرسیون خطی چند متغیره‌ی بورگوین-یانگ و شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای مدل نمودن فرآیند حفاری دورانی در دو سازند داریان و سورمه در یکی از میادین هیدروکربوری واقع در خلیج فارس استفاده شده است. برای نیل به این هدف، پس از بررسی عوامل مؤثر در حفاری، آشنایی با مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌سازی فرآیند حفاری دورانی، با اطلاعات حاصل از پنچ چاه نرخ نفوذ بر اساس پارامترهایی از قبیل عمق قائم، بار مته، سرعت دوران، شدت جریان گل و وزن مخصوص گل تخمین زده شد. با توجه به نتایج شبکه‌ی عصبی که همبستگی حدود ۹۰ درصدی بین خروجی شبکه (نرخ نفوذ پیش‌بینی شده) و خروجی مطلوب (نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده) را برای داده‌های آزمون در مقابل همبستگی حدود ۵۰-۶۰ درصد روش رگرسیون خطی چند متغیره‌ی بورگوین-یانگ برای داده‌های آزمون نشان می‌دهد، می‌توان به توانایی بالای شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی پی برد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
تقديم	الف
تشكر و قدردانى	ب
چكیده	ت
فهرست مطالب	ث
فهرست جداول	ز
فهرست اشكال	س

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- حفاری ضربه‌ای (کابلی)	۲
۳-۱- حفاری دورانی	۳
۱-۳-۱- سیستم بالابری	۳
۲-۳-۱- سیستم گردش گل حفاری	۴
۳-۳-۱- سیستم چرخش رشته‌ی حفاری	۵
۴-۳-۱- سیستم کنترل چاه	۵
۴-۱- مروری بر کاربردهای شبکه‌های عصبی در صنعت نفت و گاز	۶
۵-۱- ضرورت پایان‌نامه	۷
۶-۱- اهداف و روش انجام پایان‌نامه	۸
۷-۱- ساختار پایان‌نامه	۹

فصل دوم: عوامل مؤثر بر حفاری چاه‌های نفت و گاز

۱-۲-۱- مقدمه	۱۱
۲-۲- حفاری	۱۱
۳-۲- نرخ نفوذ (نرخ حفاری)	۱۲
۱-۳-۲- هدف از اندازه‌گیری	۱۲
۲-۳-۲- اصول اندازه‌گیری	۱۳
۴-۲- عوامل قابل کنترل	۱۳
۱-۴-۲- عوامل هندسی مؤثر بر نرخ حفاری	۱۴
۱-۴-۲-۱- قطر چاه	۱۴
۱-۴-۲-۲- عمق چاه	۱۵
۱-۴-۲-۳- زاویه‌ی انحراف در چاه‌های زاویه‌دار	۱۵
۲-۴-۲- عوامل مکانیکی مؤثر بر نرخ حفاری	۱۵
۱-۴-۲-۱- نوع و شکل مته	۱۶
۱-۴-۲-۱-۱- مته‌های مخروط چرخشی	۱۶
۱-۴-۲-۱-۱-۱- مته‌های دندانه کنگره‌ای (فولادی)	۱۷
۱-۴-۲-۱-۱-۲- مته‌های با دکمه کربید تنگستن	۱۸
۱-۴-۲-۱-۲- مته‌های تیغه ثابت (سایشی)	۱۸
۱-۴-۲-۱-۲-۱- مته‌های سایشی با تیغه فولادی	۱۹
۱-۴-۲-۱-۲-۲- مته‌های الماسی	۲۰
۱-۴-۲-۱-۲-۳- مته‌های PCD	۲۰
۱-۴-۲-۱-۲-۴- مته‌های TSP	۲۱
۱-۴-۲-۱-۲-۵- موارد استفاده از مته‌های الماسی یا PCD	۲۲

- ۲۲ شرایط عملیاتی ۲-۲-۴-۲
- ۲۳ بار روی مته (وزن آویزان از قلاب) ۳-۲-۴-۲
- ۲۳ هدف از اندازه‌گیری بار مته ۱-۳-۲-۴-۲
- ۲۴ تأثیر بار مته بر نرخ نفوذ ۲-۳-۲-۴-۲
- ۲۵ سرعت دوران مته ۴-۲-۴-۲
- ۲۵ هدف از اندازه‌گیری سرعت دوران ۱-۴-۲-۴-۲
- ۲۶ تأثیر سرعت دوران بر نرخ نفوذ ۲-۴-۲-۴-۲
- ۲۸ گشتاور ۵-۲-۴-۲
- ۲۹ هدف از اندازه‌گیری گشتاور ۱-۵-۲-۴-۲
- ۳۰ فرسودگی دندانه‌ی مته ۶-۲-۴-۲
- ۳۱ عوامل هیدرولیکی مؤثر بر نرخ حفاری ۳-۴-۲
- ۳۲ انواع سیالات حفاری ۱-۳-۴-۲
- ۳۲ وظایف سیال حفاری ۲-۳-۴-۲
- ۳۳ خصوصیات سیال حفاری ۳-۳-۴-۲
- ۳۳ وزن مخصوص گل ۱-۳-۳-۴-۲
- ۳۴ اختلاف فشار ته چاه و فشار سازند (عدم تعادل) ۱-۱-۳-۳-۴-۲
- ۳۵ جامدات همراه گل و نوع آنها ۲-۳-۳-۴-۲
- ۳۶ گرانروی گل ۳-۳-۳-۴-۲
- ۳۷ نرخ تراویدگی ۴-۳-۳-۴-۲
- ۳۸ فاز سیال ۵-۳-۳-۴-۲
- ۳۹ ترکیب شیمیایی گل ۶-۳-۳-۴-۲
- ۳۹ نرخ جریان سیال حفاری ۴-۳-۴-۲

۴۰	 ۲-۴-۵- هیدرولیک مته
۴۲	 ۲-۵- عوامل غیر قابل کنترل یا عوامل محیطی مؤثر بر نرخ حفاری
۴۲	 ۲-۵-۱- مشخصات سازند
۴۳	 ۲-۵-۲- فشار منفذی سازند

فصل سوم: مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی

۴۷	 ۳-۱- مقدمه
۴۷	 ۳-۲- شبکه عصبی بیولوژیکی
۴۹	 ۳-۳- شبکه عصبی مصنوعی
۵۱	 ۳-۴- تاریخچه شبکه‌های عصبی مصنوعی
۵۲	 ۳-۵- ساختار شبکه عصبی
۵۳	 ۳-۶- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس ساختمان کلی
۵۴	 ۳-۷- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس الگوریتم کنترل
۵۵	 ۳-۷-۱- شبکه‌های پیشخور
۵۵	 ۳-۷-۲- شبکه‌های پسخور یا برگشتی
۵۵	 ۳-۸- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس روش یادگیری
۵۶	 ۳-۸-۱- یادگیری با ناظر
۵۶	 ۳-۸-۲- یادگیری بدون ناظر
۵۶	 ۳-۸-۳- یادگیری تقویتی
۵۷	 ۳-۹- شبکه پس انتشار
۵۹	 ۳-۱۰- آموزش شبکه
۶۲	 ۳-۱۱- پارامترهای شبکه

۶۳	 ۳-۱۱-۱- تعداد لایه‌ها
۶۳	 ۳-۱۱-۲- تعداد نرون‌های پنهان
۶۳	 ۳-۱۱-۳- انتخاب نوع تابع محرک
۶۴	 ۳-۱۱-۴- مقداردهی اولیه وزن‌ها و بایاس
۶۴	 ۳-۱۱-۵- نرخ یادگیری و گشتاور
۶۵	 ۳-۱۲- مزایا و معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی
۶۷	 ۳-۱۳- عوامل کلیدی در کاربرد موفقیت آمیز شبکه‌های عصبی

فصل چهارم: مدل رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ

۶۹	 ۴-۱- مقدمه
۶۹	 ۴-۲- تحلیل هزینه‌ی حفاری
۷۰	 ۴-۳- معادله‌ی هزینه‌ی حفاری
۷۰	 ۴-۴- معادله‌ی نرخ نفوذ برای مته‌های الماسی
۷۲	 ۴-۵- معادله‌ی نرخ نفوذ برای مته‌های مخروط چرخشی
۷۴	 ۴-۶- مدل حفاری بورگوین- یانگ
۷۸	 ۴-۷- عوامل مؤثر به کار رفته در مدل حفاری بورگوین- یانگ
۷۸	 ۴-۷-۱- استحکام سازند
۷۸	 ۴-۷-۲- تراکم سازند
۷۸	 ۴-۷-۳- اختلاف فشار یا عدم تعادل
۷۹	 ۴-۷-۴- قطر و وزن مته، و سرعت دوران
۷۹	 ۴-۷-۵- فرسودگی دندان
۸۰	 ۴-۷-۶- هیدرولیک مته

- ۸-۴- روش رگرسیون چند متغیره ۸۱
- ۹-۴- حفاری بهینه ۸۵

فصل پنجم: مدل سازی نرخ نفوذ با شبکه های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ

- ۱-۵- مقدمه ۸۸
- ۲-۵- سن و سنگ شناسی سازندها ۸۸
- ۳-۵- چاه های مورد مطالعه ۹۲
- ۴-۵- انتخاب و آماده سازی داده ها ۹۴
- ۵-۵- مدل سازی نرخ نفوذ با استفاده از شبکه ی عصبی پس انتشار خطا ۱۰۰
- ۶-۵- طراحی شبکه ی عصبی پس انتشار خطا ۱۰۰
- ۱-۶-۵- نرمال کردن داده ها ۱۰۰
- ۲-۶-۵- انتخاب نوع تابع فعالیت برای نرون های لایه پنهان و لایه خروجی ۱۰۲
- ۳-۶-۵- انتخاب روش آموزشی مناسب ۱۰۲
- ۴-۶-۵- تعیین ساختار بهینه ی شبکه ۱۰۴
- ۵-۶-۵- طراحی شبکه ی پس انتشار به روش توقف سریع ۱۰۴
- ۶-۶-۵- طراحی شبکه ی پس انتشار به روش منظم سازی ۱۱۴
- ۷-۵- مدل سازی نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶- نتیجه‌گیری ۱۲۹

۲-۶- پیشنهادات ۱۳۱

منابع ۱۳۳

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱- پارامترهای حفاری مدل بورگوین- یانگ	۷۷
جدول ۴-۲- حداقل دامنهی پیشنهادی داده‌ها برای تحلیل رگرسیون	۸۲
جدول ۴-۳- مقادیر متوسط ضرایب رگرسیون مدل حفاری بورگوین - یانگ	۸۴
جدول ۴-۴- پارامترهای پیشنهادی فرسودگی دندان‌ها برای مته‌های مخروط چرخشی	۸۶
جدول ۵-۱- فواصل عمقی اطلاعات ثبت شده برای چاه‌های مختلف	۹۵
جدول ۵-۲- نمونه‌ای از فایل مرتب شده اولیه داده‌ها برای سازند داریان	۹۹
جدول ۵-۳- الگوریتم‌های آموزشی مختلف در نرم‌افزار MATLAB	۱۰۳
جدول ۵-۴- ضرایب محاسبه شده در معادله‌ی رگرسیون بورگوین- یانگ برای فواصل ۱ متری سازند داریان	۱۲۲
جدول ۵-۵- مقایسه ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای روش‌های مختلف در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون	۱۲۶

فهرست اشکال

صفحه

عنوان

فصل اول

شکل ۱-۱- دکل حفاری دورانی ۴

فصل دوم

شکل ۱-۲- تغییر مرحله به مرحله قطر چاه ۱۱

شکل ۲-۲- نمونه‌ای از مته‌های دندان‌کنگره‌ای (فولادی) ۱۷

شکل ۳-۲- نمونه‌ای از مته‌های با دکمه‌ی کربید تنگستن ۱۸

شکل ۴-۲- نمونه‌هایی از طرح‌های مختلف دندان‌ (دکمه) در مته‌های دکمه‌دار ۱۹

شکل ۵-۲- نمونه‌هایی از مته‌های سایشی با تیغه فولادی ۱۹

شکل ۶-۲- نمونه‌هایی از مته‌های الماسی ۲۰

شکل ۷-۲- نمونه‌هایی از مته‌های PCD ۲۱

شکل ۸-۲- نمونه‌هایی از مته‌های TSP ۲۱

شکل ۹-۲- اندازه‌گیری بار روی مته ۲۳

شکل ۱۰-۲- رابطه‌ی نرخ نفوذ و بار مته ۲۴

شکل ۱۱-۲- نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش بار مته ۲۵

شکل ۱۲-۲- رابطه‌ی نرخ نفوذ و سرعت دوران ۲۷

شکل ۱۳-۲- نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش سرعت دوران ۲۷

شکل ۱۴-۲- تغییرات ناگهانی گشتاور با عمق ۲۹

- شکل ۲-۱۵- راهنمای فرسودگی دندان در مته‌های دندانه کنگره‌ای ۳۰
- شکل ۲-۱۶- تأثیر وزن گل بر زمان حفاری ۳۳
- شکل ۲-۱۷- تأثیر عدم تعادل بر نرخ حفاری ۳۴
- شکل ۲-۱۸- تأثیر کمی جامدات گل بر نرخ حفاری ۳۵
- شکل ۲-۱۹- تأثیر پراکندگی جامدات بر نرخ حفاری ۳۶
- شکل ۲-۲۰- تأثیر گرانیروی بر نرخ نفوذ ۳۷
- شکل ۲-۲۱- رابطه‌ی بین هیدرولیک مته و نرخ نفوذ ۴۱
- شکل ۲-۲۲- تأثیر نیروی وارده‌ی جت بر نرخ نفوذ ۴۱
- شکل ۲-۲۳- رابطه‌ی بین مقاومت برشی سنگ و بار آستانه‌ای مته در فشار اتمسفر ۴۳
- شکل ۲-۲۴- تأثیر فشار منفذی سازند و عدم تعادل ناشی از آن بر نرخ حفاری ۴۵

فصل سوم

- شکل ۳-۱- نرون بیولوژیکی ۴۸
- شکل ۳-۲- نرون مصنوعی مک کالچ - پیتس ۵۰
- شکل ۳-۳- الف: مدل یک نرون با چند ورودی ب: فرم خلاصه شده‌ی نرون با چند ورودی ۵۳
- شکل ۳-۴- شبکه چند لایه‌ای ۵۴
- شکل ۳-۵- شبکه پسخور یا برگشتی ۵۵
- شکل ۳-۶- آموزش شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار ۵۷
- شکل ۳-۷- منحنی آموزش و اعتبارسنجی ۶۱
- شکل ۳-۸- الف: تابع تانزانانت هیپربولیک ب: تابع خطی ۶۴

فصل چهارم

شکل ۴-۱- آرایش دندانهای متهی الماسی مفروض در معادله‌ی نرخ نفوذ ۷۱

فصل پنجم

شکل ۵-۱- سن و سنگ‌شناسی (چینه‌شناسی) سازندها ۹۳

شکل ۵-۲- موقعیت چاه‌ها نسبت به یکدیگر ۹۴

شکل ۵-۳- نمونه‌ای از نگاره‌های پایش و ثبت پارامترهای حفاری مربوط به چاه D-1 ۹۷

شکل ۵-۴- نمودار گردشی تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه ۱۰۵

شکل ۵-۵- نمای کلی از ساختار شبکه پس انتشار خطا در روش توقف سریع و تعداد لایه‌های آن

برای فواصل ۱ متری سازند داریان ۱۰۶

شکل ۵-۶- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع ۱۰۸

شکل ۵-۷- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع ۱۰۸

شکل ۵-۸- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع ۱۰۹

شکل ۵-۹- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع ۱۰۹

شکل ۵-۱۰- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع ۱۱۰

شکل ۵-۱۱- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری

سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع ۱۱۰

- شکل ۵-۱۲- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع ۱۱۱
- شکل ۵-۱۳- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع ۱۱۲
- شکل ۵-۱۵- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع ۱۱۲
- شکل ۵-۱۶- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع ۱۱۳
- شکل ۵-۱۷- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع ۱۱۳
- شکل ۵-۱۸- نمودار تعیین تعداد نرون‌های لایه پنهان در روش منظم‌سازی برای فواصل ۱ متری سازند داریان ۱۱۶
- شکل ۵-۱۹- نمای کلی از ساختار شبکه پس انتشار خطا در روش منظم‌سازی و تعداد لایه‌های آن برای فواصل ۱ متری سازند داریان ۱۱۶
- شکل ۵-۲۰- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی ۱۱۷
- شکل ۵-۲۱- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی ۱۱۷
- شکل ۵-۲۲- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی ۱۱۸

شکل ۵-۲۳- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی ۱۱۸

شکل ۵-۲۴- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی ۱۱۹

شکل ۵-۲۵- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی ۱۱۹

شکل ۵-۲۶- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۳

شکل ۵-۲۷- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۳

شکل ۵-۲۸- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۴

شکل ۵-۲۹- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۴

شکل ۵-۳۰- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۵

شکل ۵-۳۱- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ ۱۲۵



فصل اول

کلیات



کلیات

۱-۱- مقدمه

از زمان‌های دور، ملت‌های متمدن، به منظور دسترسی به آب و بعضی مواد معدنی، اقدام به انجام عملیات حفاری می‌کردند. هنوز آثاری از تونل، قنات و چاه‌های عمیق حفر شده توسط ایرانیان و چینیان قدیم دیده می‌شود. آثاری از حفاری مصریان قدیم نیز پیدا شده است. تا چند دهه قبل، سیستم حفاری دستی^۱ جهت ایجاد چال برای احداث تونل خط راه آهن و معدن متداول بود و بدون شک، در مناطقی که امکان دسترسی به برق نیست، این روش حفاری هنوز کاربرد دارد. حفر اولین چاه نفت توسط شخصی به نام دریک^۲ در ایالت پنسیلوانیا را باید سرآغاز شکل‌گیری صنعت نفت در جهان دانست. از همان ابتدا حفاری به عنوان یکی از مهمترین مراحل عملیات اکتشاف و بهره‌برداری چاه‌های نفت و گاز مطرح بوده است. دلیل این امر را می‌توان در دسترسی مستقیم به هیدروکربورهای نفتی از طریق چاه حفر شده و استحصال آنها از اعماق بسیار زیاد جستجو کرد. روش‌های حفاری برحسب نوع ابزار به کار رفته، به دو گروه حفاری ضربه‌ای (کابلی)^۳ و حفاری دورانی^۴ تقسیم می‌شوند [Bourgoyne et al, 1991].

۱-۲- حفاری ضربه‌ای (کابلی)

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفاری چاه‌های نفت می‌باشد که هنوز هم از آن در حفاری چاه‌های آب استفاده می‌شود. در این روش از یک رشته لوله‌ی سنگین یا یک وزنه که بالا و پایین برده شده و به سازندها ضربه وارد می‌کند، استفاده می‌شود. عمیق‌ترین چاه حفر شده با این روش مربوط به سال ۱۹۱۸ می‌باشد که عمق آن ۲۲۵۰ متر بوده است [Nguyen, 1996].

1- Hand hold drilling

2- Drake

3- Percussive drilling (Cable tool drilling)

4- Rotary drilling

۱-۳- حفاری دورانی

حفاری دورانی رایج‌ترین و پرکاربردترین روش حفاری در صنعت نفت و گاز می‌باشد. هرچند اولین چاه‌های نفت به روش کابلی حفر شدند ولی از اوایل قرن بیستم برتری حفاری دورانی آشکار شد. تحقیقات فراوانی در این مدت صورت گرفته و پیشرفت‌هایی که مخصوصاً در زمینه طراحی و ساخت مته‌های حفاری دورانی بوجود آمده، سبب افزایش کارایی و بهینه شدن این روش شده است تا آنجا که امروزه برای دستیابی به نفت و گاز چاه‌هایی با عمق بیش از ۱۰۰۰۰ متر حفر شده است. بنابراین، هرگاه در صنعت نفت از حفاری نام می‌برند، مراد حفاری دورانی است.

دکل^۱ از مهمترین اجزاء در حفاری یک چاه است که با توجه به موقعیت و شرایط حفاری در دریا یا خشکی و حجم عملیات به شکل‌های متفاوتی دیده می‌شود، اما همواره چهار عمل اصلی بر روی آن صورت می‌گیرد که عبارتند از: بالابری^۲، چرخش رشته‌ی حفاری^۳، گردش سیال حفاری^۴ و کنترل چاه^۵. در شکل ۱-۱ قسمت‌های مختلف یک دکل حفاری دورانی نشان داده شده است [Bourgoyne et al, 1991].

۱-۳-۱- سیستم بالابری

وظیفه‌ی سیستم بالابری، پایین بردن یا بالا آوردن رشته‌ی حفاری، لوله‌های جداری و دیگر تجهیزات زیر سطحی به درون چاه یا بیرون از آن است. اجزاء اصلی سیستم بالابری عبارت است از: (۱) دکل و زیر سازه آن، (۲) جعبه قرقره و قلاب، و (۳) منجیق حفاری^۶. دو عمل عادی و دائم که به به وسیله‌ی سیستم بالابری انجام می‌شود، (۱) اتصال لوله‌های حفاری جدید^۷ و (۲) پیمایش^۸ است. اتصال لوله‌های حفاری، فرآیند دوره‌ای اضافه کردن یک مجموعه لوله جدید متناسب با عمق چاه است. پیمایش نیز، عملیات خارج نمودن رشته‌ی حفاری از چاه برای تعویض بخشی از تجهیزات

1- Rig

2- Hoisting

3- Rotating

4- Circulating

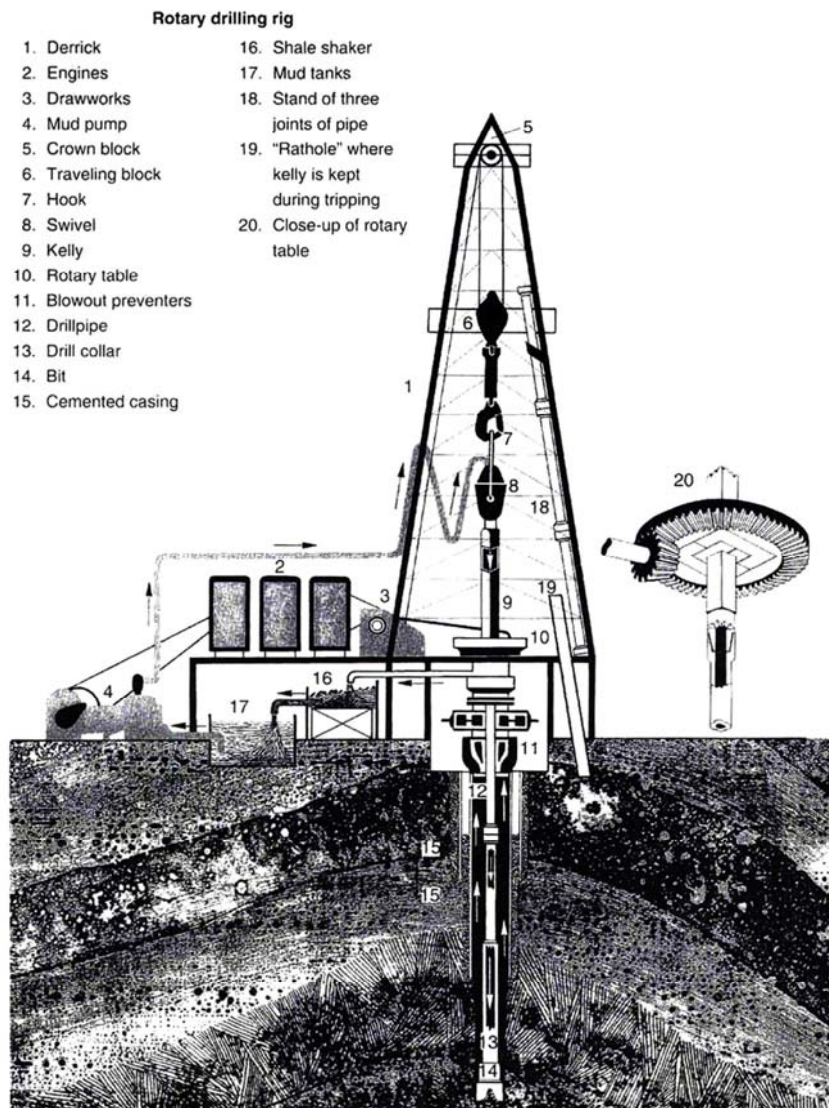
5- Controlling

6- Drawworks

7- Connection

8- Trip

ته‌چاهی و برگرداندن رشته‌ی حفاری به درون چاه است. پیمایش معمولاً برای تعویض مته‌ی کند شده انجام می‌گیرد [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۱-۱- دکل حفاری دورانی [Nguyen, 1996]

۱-۳-۲- سیستم گردش گل حفاری

وظیفه‌ی مهم سیستم گردش گل، خارج نمودن خرده‌های سنگ تولید شده در حین حفاری است. اجزاء اصلی سیستم گردش گل شامل (۱) پمپ‌های گل، (۲) گودال‌های گل، (۳) تجهیزات اختلاط گل و (۴) تجهیزات تصفیه و رفع آلودگی گل می‌باشد [Bourgoyne et al, 1991].

۱-۳-۳- سیستم چرخش رشته‌ی حفاری

سیستم چرخش، همه‌ی تجهیزات بکار رفته در چرخش مته‌ی حفاری را شامل می‌شود. قسمت‌های اصلی سیستم چرخش عبارتند از: (۱) هرزگرد^۱، (۲) کلی^۲ یا چهاربر، (۳) موتور گرداننده، (۴) میز دوار، (۵) لوله‌های حفاری و (۶) طوق‌های حفاری^۳ [Bourgoyne et al, 1991].

۱-۳-۴- سیستم کنترل چاه

سیستم کنترل چاه مانع جریان یافتن کنترل نشده‌ی سیالات سازند از چاه می‌شود وقتی که مته در یک سازند نفوذپذیر که دارای فشار منفذی مازاد بر فشار ایستابی سیال حفاری است کار می‌کند. سیالات سازند با خروج از سازند، سیال حفاری را به خارج از چاه هدایت می‌کنند. جریان یافتن سیالات سازند به درون چاه در حضور سیال حفاری، پس‌زدگی^۴ نامیده می‌شود. وظیفه‌ی سیستم کنترل چاه، (۱) تشخیص پس‌زدگی، (۲) بستن چاه در سطح زمین، (۳) گردش گل پایین‌تر از فشار سازند برای خارج کردن سیالات سازند و افزایش وزن مخصوص گل، (۴) حرکت رشته‌ی حفاری پایین‌تر از فشار سازند، (۵) دور کردن جریان گل از پرسنل و تجهیزات دکل است.

درست عمل نکردن سیستم کنترل چاه، جریان یافتن کنترل نشده‌ی سیالات سازند را در پی دارد که فوران چاه^۵ نامیده می‌شود. این شاید بدترین حادثه‌ای باشد که ممکن است در طی عملیات حفاری اتفاق بیفتد. فوران چاه می‌تواند موجب خسارات جانی، صدمه‌دیدگی تجهیزات حفاری و چاه، از دست رفتن مقداری از ذخیره‌ی نفت و گاز مخزن زیرزمینی و خسارت به محیط زیست اطراف چاه شود [Bourgoyne et al, 1991].

1- Swivel
2- Kelly
3- Drill collars
4- Kick
5- Blowout

۱-۴- مروری بر کاربردهای شبکه‌های عصبی در صنعت نفت و گاز

از شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیتشان در تشخیص روابط پیچیده در زمینه‌های مختلف مهندسی نفت همچون جریان چند فازی در لوله‌ها، مشخصات مخزن، تولید، و انتخاب مته‌ی حفاری با موفقیت استفاده شده است [Bilgesu et al, 1997].

مطالعات زیادی در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در صنعت نفت و گاز انجام شده است که در بین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقادیر نرخ نفوذ [Bilgesu et al, 1997]، بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در انتخاب بهینه‌ی مته‌ی حفاری [Yilmaz et al, 2002]، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی عمر مته بر اساس خرابی دندان‌ه یا یاتاقان [Bilgesu et al, 1998]، پیش‌بینی تخلخل و نفوذپذیری [Huang and Ali and Chawathe, 1999; Balan et al, 1995; Williamson, 1997]، پیش‌بینی نگار تخلخل با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی [Hampson et al, 2001]، توسعه میدان [Doraisamy et al, 1998]، جریان دو فازی در لوله‌ها [Ternyik et al, 1995]، تعیین مدل‌های تفسیر تست چاه [Sung et al, 1993; Al-Kaabi, 1993; Juniardi and Ershaghi, 1993; et al, 1995]، آنالیز تکمیل چاه [Shelley et al, 1998]، پیش‌بینی خرابی سازند [Nikraves et al, 1996]، بهبود خواص مخازن شکسته [Ouense et al, 1995; Zellou et al, 1998]، استفاده از شبکه عصبی برای کاهش هزینه موثر آنالیز نگارها در یک مقیاس ناحیه‌ای [Mohaghegh et al, 1999]، تولید نگارهای تشدید مغناطیسی^۱ با استفاده از نگارهای معمول از قبیل پتانسیل خودزا، اشعه گاما، قطر سنجی و مقاومت مخصوص [Mohaghegh et al, 1998]، استفاده از روش شبکه عصبی و منطق فازی برای تعیین خواص مخزن از روی داده‌های چاه‌نگاری در یکی از سواحل کره جنوبی [Lim, 2005]، مروری جامع بر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در کلیه مطالعات ژئوفیزیکی به ویژه مطالعات چاه‌پیمایی [Poulton, 2002].

1- Magnetic Resonance Imaging logs

در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی در ایران می‌توان به تعیین نفوذپذیری سنگ مخزن میدان پاریسی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی [تدینی و همکاران، ۱۳۸۳]، تخمین تخلخل و نفوذپذیری میدان نفتی گچساران با استفاده از شبکه عصبی [جلالی لیچائی و همکاران، ۱۳۸۳]، تخمین نگاره‌های خام چاه‌نگاری با استفاده از روش شبکه عصبی در چاه‌های قدیمی نفت [خاکبازان و همکاران، ۱۳۸۳]، تخمین تخلخل سنگ مخزن با استفاده از سیستم شبکه‌های عصبی مصنوعی [کدخدائی ایلچی و همکاران، ۱۳۸۳]، شبیه سازی نگار فوتوالکتریک سازندهای نفتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی [بخشی، ۱۳۸۲]، شبیه سازی نگار فوتوالکتریک سازندهای نفتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی [مرادزاده و بخشی، ۱۳۸۵]، مدل سازی معکوس دو بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی [طهماسبی، ۱۳۸۳]، پیش‌بینی نفوذپذیری از روی داده‌های چاه‌نگاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران [حبیبیان و همکاران، ۱۳۸۴]، مدل سازی نگاره‌های شاخص فوتوالکتریک و زمان گذر صوت به کمک روش‌های عصبی - فازی در چاه‌های نفت [بدری، ۱۳۸۴] اشاره نمود. با توجه به نتایج حاصل در این مطالعات می‌توان به قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه مدل سازی و تخمین پی برد. با توجه به این که میادین نفتی در مناطق مختلف از زمین‌شناسی متفاوتی برخوردار است، طراحی شبکه عصبی برای هر میدان با میدان دیگر تفاوت‌هایی خواهد داشت.

۱-۵- ضرورت پایان نامه

افزایش راندمان حفاری و در نتیجه کاهش هزینه‌ها، دغدغه اصلی شرکت‌های فعال در زمینه حفاری می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در بالا بودن سهم هزینه‌ی عملیات حفاری در مجموعه عملیات اکتشاف و بهره‌برداری میادین نفت و گاز جستجو کرد. از این رو یافتن مدلی که بتواند ارتباط بین پارامترهای مؤثر در حفاری و نرخ حفاری (نرخ نفوذ) را که یکی از بهترین شاخص‌های راندمان حفاری است، بیان کند از اهمیت بسزایی برخوردار است. این مدل می‌تواند مؤید ویژگی حفارپذیری^۱

1- Drillability

(قابلیت حفاری) زمین و سازندهای تحت حفاری و ابزاری برای تعیین مقدار بهینه‌ی این پارامترها در حفاری چاه‌های بعدی در میدان هیدروکربوری مورد نظر باشد. مدل‌های ریاضی بسیاری همچون مدل خطی چند متغیره‌ی بورگوین-یانگ برای بیان نرخ حفاری بر اساس پارامترهای حفاری ارائه شده‌اند. حال آن که هیچ تضمینی دال بر وجود رابطه خطی بین این پارامترها و راندمان حفاری وجود ندارد. با توجه به سابقه استفاده از شبکه‌های عصبی و توانایی آنها در حل مسائل غیر خطی در علوم مختلف به نظر می‌رسد بتوان از آنها برای مدل‌سازی راندمان حفاری استفاده کرد. از طرفی تلاش‌های کمی نیز در این رابطه در کشور صورت گرفته، لذا لزوم انجام چنین مطالعه‌ای بیش از پیش احساس می‌شود.

۱-۶- اهداف و روش انجام پایان‌نامه

هدف از انجام این مطالعه بررسی توانمندی شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی راندمان حفاری و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج مدل رگرسیون خطی چند متغیره‌ی بورگوین-یانگ می‌باشد. برای نیل به این هدف از داده‌های مربوط به پایش^۱ عملیات حفاری و اطلاعات دیگر مرتبط با آن نظیر مطالعات پترولوژی، گِل‌نگاری^۲ و مسیرنگاری^۳ چاه در چاه‌های حفر شده استفاده شده و پس از بررسی‌های اولیه و توجه به کیفیت داده‌های در دسترس، داده‌های مورد نیاز برای انجام مدل‌سازی انتخاب می‌گردد. با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره‌ی بورگوین-یانگ و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، نرخ نفوذ مته‌ی حفاری محاسبه می‌شود. برنامه‌های مورد نیاز برای انجام این کار با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نوشته و تهیه می‌گردد. در نهایت جهت بررسی دقت کار، نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در چاه‌ها با نرخ نفوذ محاسبه شده در هر روش مقایسه شده و بهترین مدل جهت استفاده در حفاری چاه‌های بعدی انتخاب می‌شود.

1- Monitoring

2- Mud logging

3- Trajectory Measurement

۱-۷- ساختار پایان نامه

پایان نامه‌ی حاضر در شش فصل تنظیم شده است. در فصل اول مقدمه‌ای در باب ضرورت، هدف و چگونگی انجام این مطالعه و مختصری در مورد اصول و روش‌های حفاری چاه‌های نفت و گاز و نیز مروری بر کارهای انجام شده در زمینه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در صنعت نفت ارائه شده است. فصل دوم به بررسی عوامل مؤثر بر حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌پردازد تا زمینه را برای شناخت هر چه بهتر پارامترهای دخیل در حفاری و رابطه‌ی آنها با نرخ نفوذ فراهم کند. در فصل سوم، به مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی پرداخته شده است. مدل‌سازی فرآیند حفاری دورانی با تأکید بر مدل رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ موضوع فصل چهارم پایان نامه است. فصل پنجم شامل زمین شناسی منطقه، طراحی شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره و مقایسه نتایج آنها با هم می‌باشد. در فصل ششم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آورده شده است.



فصل دوم

عوامل مؤثر بر حفاری چاه‌های نفت و گاز



عوامل مؤثر بر حفاری چاه‌های نفت و گاز

۱-۲- مقدمه

مدل‌سازی حفاری چاه‌های نفت و گاز بدون شناخت عوامل مؤثر بر حفاری و نحوه‌ی تأثیر آنها بر پیشرفت عملیات حفاری ممکن نخواهد بود. حجم قابل توجهی از کارهای تجربی و مطالعاتی صرف مطالعه‌ی اثر این عوامل بر نرخ حفاری شده است. در بیشتر این کارهای مطالعاتی، تنها اثر یک متغیر با فرض ثابت بودن سایر متغیرها دیده شده است. در این فصل عوامل مؤثر بر حفاری با توجه به ماهیت و شکل تأثیرگذاری هر یک، در چهار گروه مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از آنجایی که مطالعه‌ی این عوامل با جزئیات و حواشی بسیاری همراه است، سعی شده در حین مختصر بودن نسبتاً کامل و در برگیرنده‌ی بیشتر عوامل تأثیرگذار باشد. عواملی که نرخ حفاری را بیشتر تحت تأثیر قرار داده و در مدل‌سازی نیز به عنوان یکی از متغیرهای ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بیش از سایر عوامل مورد بحث واقع شده‌اند.

۲-۲- حفاری

حفاری، فروپاشی توده‌ی سنگ در تقابل بین مته و سنگ، و اعمال نیروهای برشی مختلف است. با این حال بازده حفاری یا به عبارت دیگر نرخ نفوذ مته، مشخصاً به نحوه‌ی انتقال انرژی بین مته و سنگ بستگی دارد [Karanam and Misra, 1998].

سه مؤلفه‌ی اصلی برای هر نوع سیستم حفاری می‌توان برشمرد:

۱- ماشین حفاری (منبع انرژی^۱ یا تولیدکننده)

1- Source of energy

۲- رشته‌ی حفاری (انتقال دهنده)^۱

۳- مته (مصرف کننده)^۲

به این سه مؤلفه در حفاری دورانی مؤلفه‌ی چهارمی نیز به نام سیال حفاری اضافه می‌شود که وظایفی همچون پاکسازی چاه، کنترل گرد و غبار، خنک‌کاری مته و در مواقعی پایدارسازی دیواره‌های چاه را بر عهده دارد [Karanam and Misra, 1998].

عوامل مؤثر بر نرخ حفاری را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد: عوامل قابل کنترل و عوامل غیر قابل کنترل (عوامل محیطی) [Karanam and Misra, 1998].

۲-۳- نرخ نفوذ^۳ (نرخ حفاری)^۴

۲-۳-۱- هدف از اندازه‌گیری

نرخ نفوذ حاصل از مته‌ی حفاری به همراه نرخ فرسودگی مته، تأثیری قطعی و مستقیم روی هزینه‌های حفاری به ازای هر فوت دارند. اندازه‌گیری نرخ نفوذ از اهمیت زیادی برای زمین‌شناس برخوردار است. زیرا شاخص بلاواسطه‌ای را برای او فراهم می‌کند که نسبت به تغییرات لیتولوژی حساس بوده و می‌تواند در کنار نتایج حاصل از چاه‌پیمایی مورد بررسی قرار گیرد [Bourgoyne et al, 1991; Nguyen, 1996].

حفار نیز به اندازه‌گیری نرخ حفاری علاقه‌مند است زیرا به او در موارد زیر کمک می‌کند:

- بررسی چگونگی عملکرد مته‌ها (به عنوان مثال فرسودگی و شکستگی دندان‌های مته)
- بهینه‌سازی پارامترهای حفاری (بار روی مته و سرعت دوران مته)
- نظارت بر چگونگی انجام دستورالعمل‌های مربوط به چاه

1- Transmitter

2- Applicator

3- Rate of Penetration (ROP) or Penetration Rate

4- Drilling Rate

۲-۳-۲- اصول اندازه‌گیری

اندازه‌گیری نرخ نفوذ مته شبیه به اندازه‌گیری جابجایی یا چرخش یک بخش مکانیکی از رشته‌ی حفاری است، البته در صورتی که فرض شود بین پیشروی مته و حرکت قابل مشاهده‌ی ناشی از آن در سطح زمین ارتباط مستقیمی وجود دارد. این ارتباط توسط ساقه‌ی حفاری فراهم می‌شود که می‌توان آن را به عنوان طولی ثابت که مقادیر تنش در آن تغییر نمی‌کند در نظر گرفت. انتخاب فواصل عمقی (که در آنها تغییرات تنش بسیار کم باشد) برای اندازه‌گیری بسیار مهم است. فواصل عمقی انتخابی معمولاً ۲۵ سانتیمتر، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتر هستند [Nguyen, 1996].

انتخاب بخش مکانیکی

- ثبت جابه‌جایی

- حرکت کلی یا هرزگرد (بدون ثبت در زمان پیمایش)

- حرکت قرقره متحرک

- ثبت چرخش

- حرکت چرخک^۱ قرقره ثابت

- چرخش استوانه‌ی^۲ منجنیق حفاری

البته امروزه با توجه به پیشرفته‌های صورت گرفته در چاه‌نگاری و فناوری‌های پایش عملیات حفاری برای اندازه‌گیری از ابزار و حسگرهای الکترونیکی استفاده می‌شود.

۲-۴- عوامل قابل کنترل

همانطور که از نام عوامل قابل کنترل پیداست تغییر این عوامل در اختیار عامل انسانی بوده و می‌توان آنها را در سه دسته‌ی عوامل هندسی، مکانیکی و هیدرولیکی بررسی کرد.

1- Pulley

2- Drum

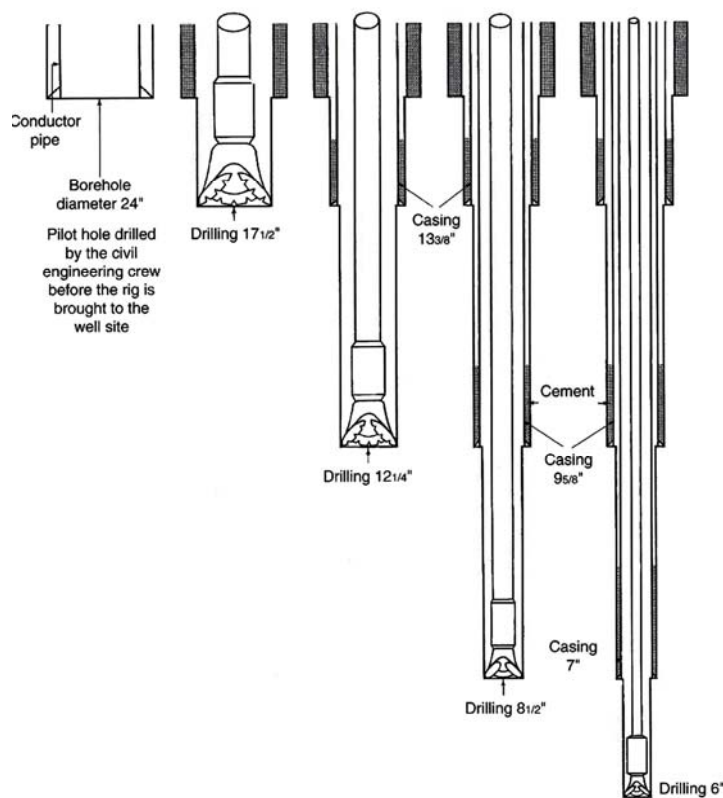
۲-۴-۱- عوامل هندسی مؤثر بر نرخ حفاری

نقش عوامل هندسی مؤثر بر نرخ حفاری باید در کنار دیگر عوامل بررسی شود و گاهی بدلیل همین ارتباط تناتنگ با عوامل دیگر و محدودیت‌های طراحی، این عوامل را در زمره‌ی عوامل غیر قابل کنترل قرار می‌دهند. پارامترهای هندسی چاه با توجه به محل و وضعیت قرارگیری مناطق امیدبخش و مخازن هیدروکربوری در زیر زمین در مرحله طراحی چاه تعیین می‌شوند.

۲-۴-۱-۱- قطر چاه

طراحی قطر چاه در حفاری همواره بگونه‌ای است که از قطرهای بیشتر در افق‌های سطحی شروع شده و با پیشرفت حفاری در افق‌های عمیق‌تر از میزان قطر چاه در فواصل عمقی مشخص کاسته می‌شود تا در نهایت چاه به هدف مورد نظر برسد (شکل ۲-۱) [Nguyen, 1996].

قطر چاه دارای رابطه معکوس با نرخ حفاری است یعنی هرچه قطر کمتر باشد، سرعت حفاری بیشتر خواهد بود.



شکل ۲-۱- تغییر مرحله به مرحله‌ی قطر چاه [Nguyen, 1996]

۲-۴-۱-۲- عمق چاه

تأثیر عمق چاه نیز همانند قطر چاه است به این صورت که هر چه عمق حفاری بیشتر باشد، از میزان نرخ حفاری کاسته می‌شود. البته این پارامتر در ارتباط تنگاتنگ با سایر عوامل حفاری است و نمی‌توان آن را جدا از سایر عوامل تأثیرگذار مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال با افزایش عمق حفاری بدلیل افزایش وزن طبقات بالایی، فشار سازند در نقطه حفاری افزایش خواهد یافت و برای غلبه بر این فشار می‌بایست بر وزن گل اضافه کرد که در نتیجه موجب کاهش نرخ حفاری خواهد شد.

۲-۴-۱-۳- زاویه‌ی انحراف در چاه‌های زاویه‌دار

با توجه به پیشرفت صنعت حفاری در دهه‌های اخیر، از حفاری زاویه‌دار و افقی با توجه به اهداف خاص آن استفاده بیشتری می‌شود و خود شاخه‌ای مهم در صنعت حفاری محسوب می‌گردد. بررسی عوامل مؤثر در این نوع حفاری با توجه به الزامات خاص آن از حوصله‌ی این بحث خارج بوده و مجالی مختص به خود را می‌طلبد. با این حال، بطور کلی می‌توان گفت هرچه زاویه‌ی انحراف از قائم در چاهی بیشتر باشد، حفاری با آهنگ کندتری پیش خواهد رفت.

۲-۴-۲- عوامل مکانیکی مؤثر بر نرخ حفاری

سازندهای تحت حفاری دارای دامنه‌ی وسیعی از درجه سختی هستند و نفوذ در آنها ممکن است از ۱۰۰ متر در ساعت تا چند ده سانتی‌متر در ساعت در حال تغییر باشد. در سازندهای دارای سنگ‌های خرد شده و درزه و شکاف‌دار، با وجود چنین تفاوت‌هایی در قابلیت حفاری^۱، متدهای مورد استفاده بطور قطع بر اساس اصول و شرایط متفاوتی کار خواهند کرد [Nguyen, 1996].

1- Drillability

۲-۴-۱-۲- نوع و شکل مته

در فرآیند حفاری یک چاه، مته‌ی حفاری جزو اساسی‌ترین ابزار مورد استفاده است و انتخاب مته و شرایط عملیاتی آن یکی از مهمترین مسائلی است که یک مهندس حفاری با آن سر و کار دارد [Bourgoyne et al, 1991]. در انتخاب مته کارکرد مته‌ی قبلی، مطالعات سنگ‌شناسی زمین‌شناس و هزینه‌های حفاری به دلار در فوت مد نظر قرار می‌گیرد. بعضی وقت‌ها تغییر دائم طرح و نوع مته‌های تولیدی، انتخاب را دشوار می‌سازد [Moore, 1986].

مته‌های حفاری دورانی بر اساس طرح‌شان معمولاً به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- مته‌های تیغه متحرک (مخروط چرخشی)^۱
 - مته‌های دندانه کنگره‌ای (فولادی)^۲
 - مته‌های با دکمه کربید تنگستن^۳، TCI
- مته‌های تیغه ثابت^۴ (سایشی)
 - مته‌های سایشی با تیغه فولادی^۵
 - مته‌های الماسی^۶
 - مته‌های چند بلوری الماسی^۷، PCD
 - مته‌های TSP^۸

۲-۴-۱-۱- مته‌های مخروط چرخشی

این نوع مته‌ها از دو یا چند مخروط که دارای عناصر بُرنده هستند تشکیل شده‌اند و در حالی که کل مته در ته چاه می‌چرخد، هر کدام از مخروط‌ها حول محور خود در حال چرخش هستند. استفاده

1- Roller cutter or Roller cone bits

2- Milled or Steel tooth cutters

3- Tungsten Carbide Insert cutters, TCI

4- Fixed cutter or Drag bits

5- Steel cutters drag bits

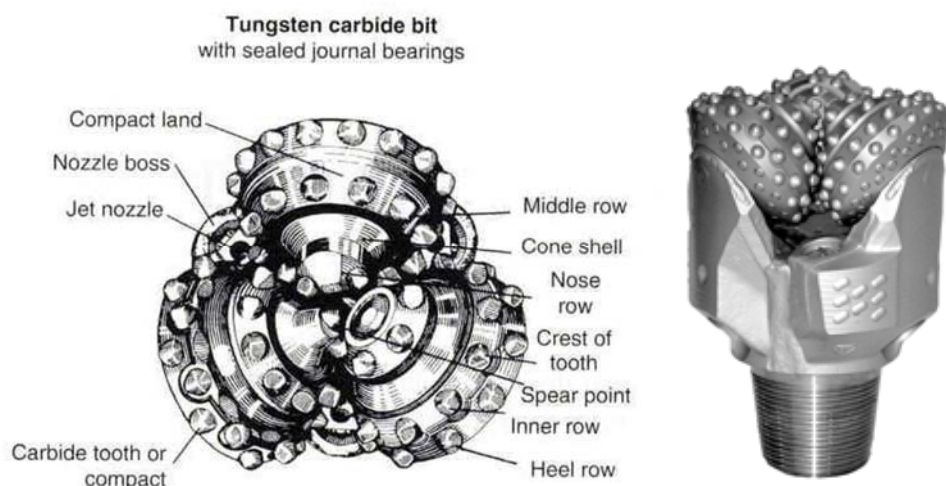
6- Diamond bits

7- Polycrystalline Diamond (Compact) bits, PCD or PDC

8- Thermally Stable Polycrystalline diamond bits, TSP

۲-۴-۱-۱-۲- مت‌های با دکمه کربید تنگستن، TCI

نوع دیگری از مت‌های مخروط چرخشی از فرونشاندن استوانه‌های کربید تنگستن به درون حفره‌هایی که بر روی مخروط‌ها به دقت ماشین‌کاری شده‌اند تشکیل می‌شوند. به این نوع مت‌ها، مت‌های با دکمه‌ی کربید تنگستن می‌گویند (شکل ۲-۳). دندان‌های کربید تنگستن طراحی شده برای حفاری در سازندهای نرم، بلند بوده و دارای نوک اسکنه‌ای شکل^۱ (قلمی شکل) هستند. دکمه‌های بکار رفته در مت‌های مخصوص سازندهای سخت، کوتاه و دارای نوک نیمه‌کروی^۲ هستند. مثال‌هایی از طرح‌های مختلف دندان‌های مت‌های دکمه‌دار در شکل ۲-۴ نشان داده شده است [Nguyen, 1996; Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۳- نمونه‌ای از مت‌های با دکمه‌ی کربید تنگستن

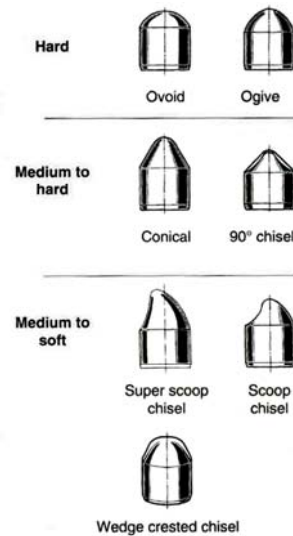
[Nguyen, 1996; www.bakerhughes.com, 2006]

۲-۴-۱-۲- مت‌های تیغه ثابت (سایشی)

تقریباً همه‌ی این نوع مت‌ها از تیغه‌های بُرنده‌ی ثابت که با بدنه‌ی مت یکپارچه هستند تشکیل شده‌اند و چرخش آنها از چرخش رشته‌ی حفاری جدا نیست. استفاده از این نوع مت‌ها به زمان معرفی حفاری دورانی در اواخر قرن نوزدهم بر می‌گردد.

1- Chisel-shaped end

2- Hemispherical end

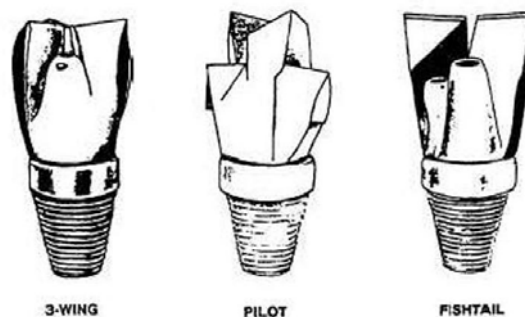


شکل ۲-۴- نمونه‌هایی از طرح‌های مختلف دندانه (دکمه) در مته‌های دکمه‌دار [Nguyen, 1996]

مزیت مته‌های تیغه ثابت بر مته‌های مخروط چرخشی در نداشتن هیچ‌گونه بخش‌های چرخنده است که این مسئله در چاه‌های کم قطر که فضای کافی برای طراحی عناصر برنده و یاتاقان‌هایی با مقاومت مناسب کم است بسیار مهم می‌باشد. از طرفی با توجه به یک تکه بودن مته‌های تیغه ثابت امکان شکسته شدن آنها کمتر است [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۱-۲-۱-۲-۱-۲-۴-۲- مته‌های سایشی با تیغه فولادی

مته‌های سایشی با تیغه فولادی جزو اولین گروه از مته‌هایی بودند که در صنعت حفاری بکار رفتند. این مته‌ها از عناصر برنده‌ی فولادی که غالباً شبیه به دم ماهی^۱ هستند تشکیل شده‌اند و عمده موارد مصرف آنها در سازندهای نرم، یکنواخت و غیر متراکم است [Bourgoyne et al, 1991; Devereux, 1999].



شکل ۲-۵- نمونه‌هایی از مته‌های سایشی با تیغه فولادی [www.tpub.com, 2007]

1- Fish tail

۲-۴-۲-۱-۲-۲-۲- مت‌های الماسی

از مت‌های الماسی بیشتر در سازندهای غیرشکننده (تُرد) که در شرایط تنشی ته چاه دارای حالت شکست پلاستیک هستند استفاده می‌شود. اندازه و تعداد الماس‌های بکار رفته در مت‌های الماسی به سختی سازند تحت حفاری بستگی دارد.

- مت‌های مربوط به سازندهای سخت دارای دانه‌های خیلی کوچک الماس هستند (۰/۰۷ تا ۰/۱۲۵ قیراط)
- مت‌های مربوط به سازندهای نرم دارای دانه‌های نسبتاً بزرگ الماس هستند (۰/۷۵ تا ۲ قیراط)

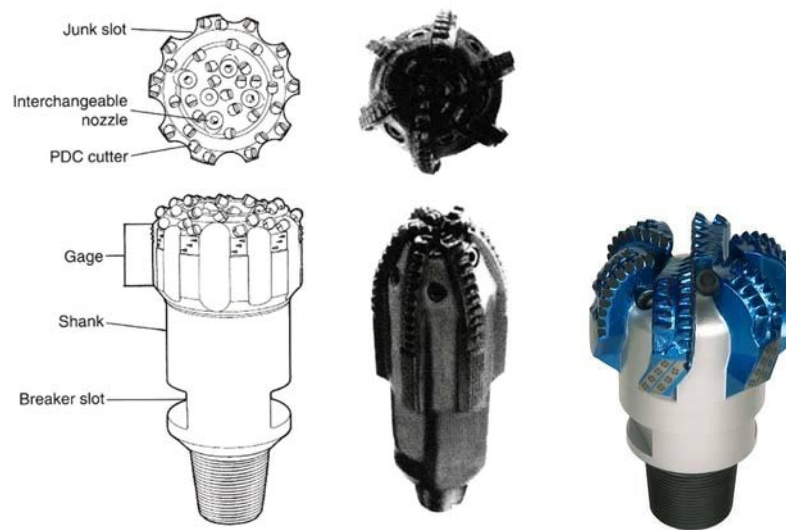


شکل ۲-۶- نمونه‌هایی از مت‌های الماسی [Nguyen, 1996; www.bakerhughes.com, 2006]

۲-۴-۲-۱-۲-۳- مت‌های PCD

از اواسط دهه‌ی ۱۹۷۰ خانوادگی جدیدی از مت‌های تیغه ثابت به نام مت‌های PCD معرفی شدند. این مت‌ها دارای دانه‌ها یا دکمه‌های چند بلوری الماس بوده که بر بدنه‌ی مت همجوش (فلزکاری) شده‌اند و عناصر بُرنده مت را تشکیل می‌دهند [Nguyen, 1996]. بهترین عملکرد آنها در سازندهای نرم، سفت، نسبتاً سخت و غیرساینده که چسبنده^۱ نیستند می‌باشد.

1- Gummy



شکل ۷-۲- نمونه‌هایی از مته‌های PCD [Nguyen, 1996; www.reedhycalog.com, 2006]

۲-۴-۱-۲-۴-۲ مته‌های TSP

مته‌های TSP نسل توسعه‌یافته مته‌های الماسی هستند. در این نوع مته‌ها بر خلاف مته‌های PCD، الماس‌های TSP به گونه‌ای عمل‌آوری شده‌اند که عناصر ناجور آنها از نقطه نظر انبساط حرارتی حذف گردد و بنابراین می‌توانند دماهای مورد نیاز برای ساخت ماتریکس کربیدی را تحمل کنند. الماس‌های TSP به واسطه شکل مثلثی‌شان دارای لبه‌های تیزی برای برش سنگ هستند و غالباً همراه الماس‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند [Nguyen, 1996].



شکل ۸-۲- نمونه‌هایی از مته‌های TSP [Nguyen, 1996; www.reedhycalog.com, 2006]

۲-۴-۱-۲-۵- موارد استفاده از مته‌های الماسی یا PCD

همانند هر متهی دیگری، تصمیم به حفاری با متهی الماسی یا PCD می‌بایست بر اساس تحلیل اقتصادی باشد. شرایط حفاری تعیین می‌کند که استفاده از یک متهی الماسی اقتصادی است یا خیر. برخی از این شرایط عبارتند از:

- ۱- مواقعی که عمر مته‌های چرخشی بدلیل فرسودگی و ساییدگی یاتاقان‌ها یا دندان‌ها، یا بخاطر شکستگی دندان‌ها کم باشد.
- ۲- نرخ نفوذ بخاطر بالا بودن وزن مخصوص گل یا نامناسب بودن توان هیدرولیکی دکل خیلی پایین باشد.
- ۳- در چاه‌هایی با قطر ۶ اینچ یا کمتر که عمر مته‌های چرخشی کوتاه است.
- ۴- وقتی که زاویه‌ی انحراف در چاه‌های زاویه دار افزایش یابد.
- ۵- هنگامی که افزایش بار روی مته محدودیت داشته باشد.
- ۶- در حفاری توربو^۱ که سرعت‌های بالای دوران موجب تسریع نفوذ متهی الماسی می‌شود [Nguyen, 1996].

۲-۴-۲- شرایط عملیاتی^۲

تأثیر بار روی مته و سرعت دوران بر نرخ نفوذ توسط محققان زیادی هم در کارهای آزمایشگاهی و هم در کارهای صحرایی مورد مطالعه قرار گرفته است [Bourgoyne et al, 1991]. به دلیل اهمیت خیلی زیاد این دو پارامتر، از آنها با عنوان شرایط عملیاتی مته یاد می‌شود و گاهی تأثیر آنها بر نرخ نفوذ به صورت همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا نیز، به این دو پارامتر به صورتی ویژه پرداخته شده است.

1- Turbodrilling
2- Operating conditions

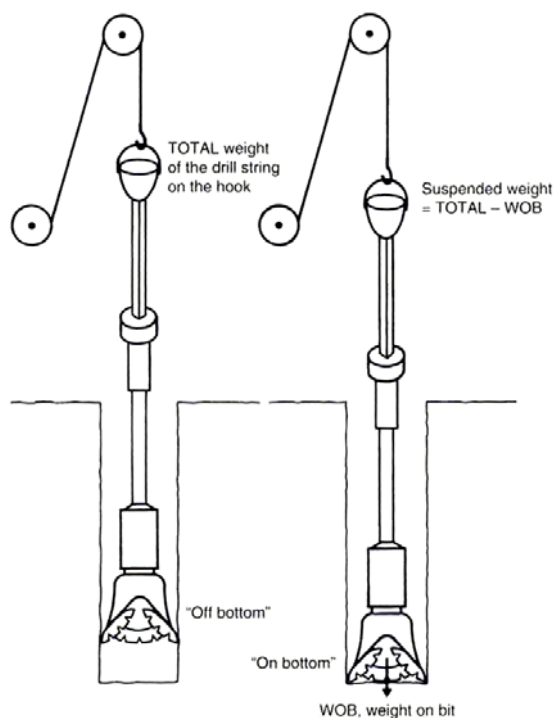
۲-۴-۳- بار روی مته^۱ (وزن آویزان از قلاب)، WOB

بار روی مته، اختلاف بین وزن آویزان از قلاب با مته‌ی آزاد (جدا) از ته چاه (نا برجا^۲) و مته‌ی درگیر با ته چاه (برجا^۳) و در شرایطی که ساقه‌ی حفاری در حال چرخش و گل حفاری در حال گردش باشد، است (شکل ۲-۹). با این حال، اختلاف در نیروی کششی تنها در چاه‌های قائم می‌تواند نشان دهنده‌ی بار واقعی روی مته باشد و برای چاه‌های زاویه‌دار نمی‌تواند درست باشد. در این مورد ساییده شدن به دیواره‌ی چاه بسیار مهم بوده و نباید نادیده گرفته شود [Nguyen, 1996].

۲-۴-۳-۱- هدف از اندازه‌گیری بار مته

در اندازه‌گیری بار مته اهداف زیر را می‌توان برشمرد [Nguyen, 1996]:

- بررسی چگونگی عملکرد مته در حفاری چاه
- تشخیص کشش غیر عادی در هنگام پیمایش (وزن روی قلاب)
- ارزیابی و بهبود نرخ نفوذ



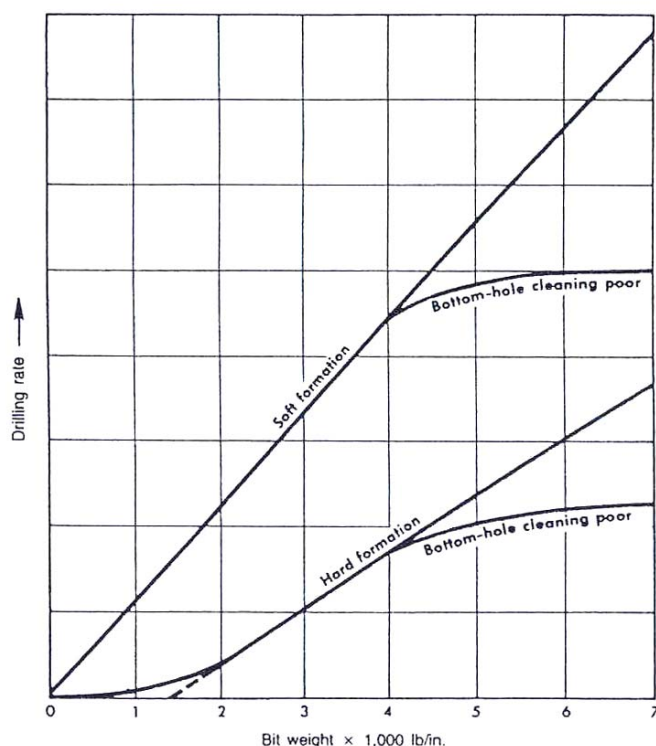
شکل ۲-۹- اندازه‌گیری بار روی مته [Nguyen, 1996]

- 1- Weight On Bit, WOB
- 2- Off bottom
- 3- On bottom

۲-۴-۲-۳-۲- تأثیر بار مته بر نرخ نفوذ

آزمایش‌های صحرایی نشان می‌دهد که نرخ نفوذ (نرخ حفاری) به شکل مستقیم با بار مته افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۰ نمونه‌ای از نتایج عملیات میدانی است.

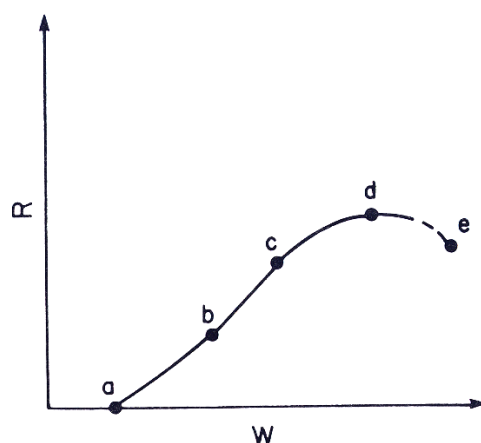
با توجه به شکل ۲-۱۰، تناسبی بین نرخ‌های نفوذ در سازند سخت با بارهای کمتر از ۲۰۰۰ پوند بر اینچ وجود ندارد. صرفنظر از نوع مته، فشار وارده‌ی مته به سنگ باید به اندازه‌ای باشد که بتواند بر مقاومت فشاری سنگ‌های سازند غلبه کند. در این مورد، برای شکستن سنگ حدود ۱۵۰۰ پوند بر اینچ بار مته نیاز می‌باشد. برای هر دو سازند نرم و سخت، تا زمانی که پاکسازی ته چاه به شکل مناسبی انجام گیرد نرخ نفوذ به صورت مستقیم با بار مته افزایش پیدا می‌کند. بطور کلی این رابطه برای هر نوع مته از جمله مته‌های دکمه‌دار برقرار است. حد بالای این رابطه هنگامی اتفاق می‌افتد که بدنه مته در تماس با سازند قرار گیرد [Moore, 1986].



شکل ۲-۱۰- رابطه‌ی نرخ نفوذ و بار مته [Moore, 1986]

در شکل ۲-۱۱ نمودار نمونه‌ی نرخ نفوذ - بار مته که بصورت تجربی با فرض ثابت بودن سایر متغیرهای حفاری بدست آمده و از شکل خاصی برخوردار می‌باشد نشان داده شده است. تا زمانی که

بار روی مته به مقدار آستانه‌ای خود نرسد، نرخ نفوذ تغییر آنچنانی پیدا نخواهد کرد (نقطه a). از اینجا به بعد با افزایش بار مته، نرخ نفوذ به سرعت برای مقادیر متوسط بار مته افزایش خواهد یافت (بخش ab). اغلب می‌توان رفتاری خطی را برای مقادیر متوسط بار مته مشاهده کرد (بخش bc). با این حال، در مقادیر بالاتر بار مته، افزایش پی در پی بار مته تنها اندکی بهبود را در نرخ نفوذ به دنبال خواهد داشت (بخش cd). در بعضی موارد، در مقادیر بسیار بالای بار مته، کاهش نرخ نفوذ قابل مشاهده است (بخش de). غالباً این نوع رفتار « افت کارایی مته^۱ » نامیده می‌شود. پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در مقادیر بالای بار مته معمولاً ناشی از پاکسازی ناکافی ته چاه متناسب با تولید بیشتر خرده‌های حفاری یا فرو رفتن کامل عناصر برنده‌ی مته به درون سازند است [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۱۱- نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش بار مته [Bourgoyne et al, 1991]

۲-۴-۲-۴-۲- سرعت دوران مته^۲

۲-۴-۲-۴-۱- هدف از اندازه‌گیری سرعت دوران

با اندازه‌گیری سرعت دوران می‌توان به اهداف زیر دست یافت [Nguyen, 1996]:

- بررسی عمر مته (خصوصاً عمر یاتاقان)
- انتخاب پارامترهای بهینه پیشرفت حفاری (به همراه بار مته)
- ارزیابی و بهبود نرخ نفوذ

1- Bit floundering
2- Rotary speed

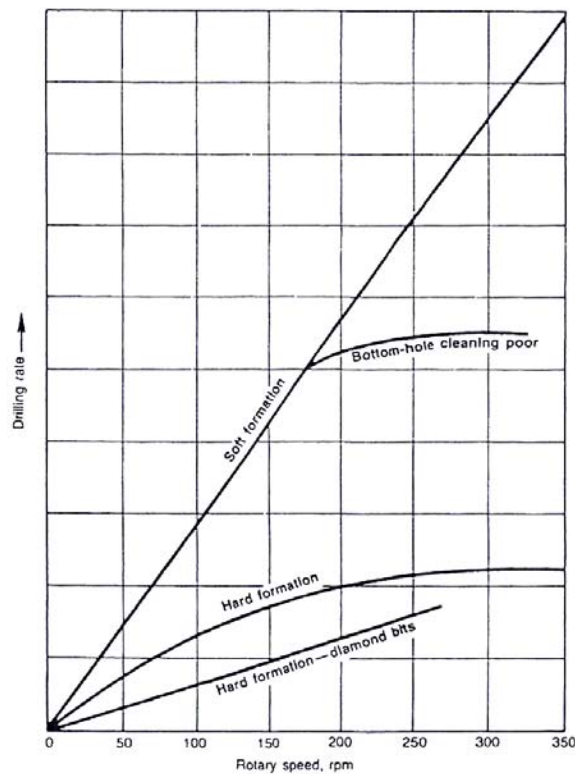
۲-۴-۲-۴-۲- تأثیر سرعت دوران بر نرخ نفوذ

مطالعات نشان می‌دهد که رشد نرخ نفوذ نسبت مستقیمی با سرعت دوران در سازندهای نرم بر خلاف سازندهای سخت دارد. در سازندهای سخت، نرخ نفوذ در سرعت‌هایی بیش از سرعت بهینه دوران، افزایش بیشتری نخواهد داشت [Nguyen, 1996].

سرعت دوران همچنین ممکن است به وسیله‌ی عوامل زیر محدود شود [Nguyen, 1996]:

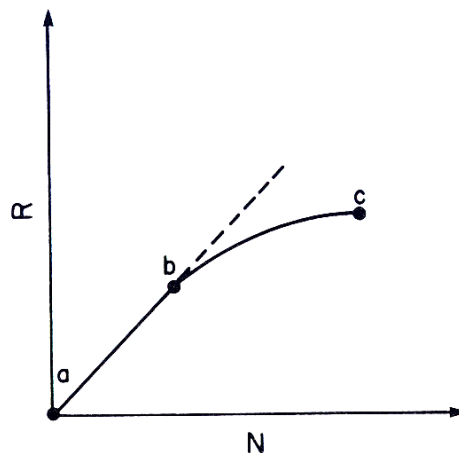
- لرزش‌های رشته‌ی حفاری (پدیده تشدید که امکان خستگی و شکستگی را افزایش خواهد داد)
- نوع مشخصی از مته‌ها (مته‌های دکمه‌دار) که بر اساس خُرد کردن سنگ کار می‌کنند (سرعت دوران اضافی موجب کاهش نرخ نفوذ و تخریب دکمه‌های کربید تنگستن می‌گردد)
- ساییدگی در چاه‌های زاویه‌دار

رابطه‌ی بین نرخ نفوذ و سرعت دوران مته در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. توجه داشته باشید که در سازندهای نرم نرخ نفوذ رابطه‌ی مستقیمی با سرعت دوران دارد. در حالی که در سازندهای سخت میزان افزایش سرعت حفاری با سرعت دوران از آهنگ کُندتری برخوردار است. این مطلب علت اصلی استفاده از سرعت‌های بالای دوران، ۱۵۰ دور در دقیقه یا بیشتر در سازندهای نرم و سرعت‌های پایین دوران (۷۵-۴۰ دور در دقیقه) در سازندهای سخت است. همانطور که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده مته‌های الماسی از این قاعده مستثنی می‌باشند. در صورتی که پاکسازی ته چاه به شکل مناسبی انجام پذیرد، افزایش نرخ‌های نفوذ با سرعت دوران از ارتباط نزدیکتری برخوردار خواهد بود. علت علاقه‌ی بیشتر اپراتورها به استفاده از گرداننده‌های ته چاهی، که مته‌های الماسی را با سرعت چند صد دور در دقیقه می‌چرخانند نیز همین رابطه است [Moore, 1986].



شکل ۲-۱۲- رابطه‌ی نرخ نفوذ و سرعت دوران [Moore, 1986]

در شکل ۲-۱۳ نمودار نمونه‌ی نرخ نفوذ - سرعت دوران که با فرض ثابت بودن سایر متغیرهای حفاری بدست آمده نشان داده شده است. نرخ نفوذ معمولاً در مقادیر کم سرعت دوران بصورت خطی افزایش پیدا می‌کند (بخش ab). در مقادیر بالاتر سرعت دوران، با افزایش سرعت دوران نرخ نفوذ کاهش پیدا می‌کند (بخش bc). پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در مقادیر بالای سرعت دوران نیز بدلیل پاکسازی ناکافی ته چاه می‌باشد [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۱۳- نمونه پاسخ نرخ نفوذ به افزایش سرعت دوران [Bourgoyne et al, 1991]

در شکل‌های ۲-۱۰ و ۲-۱۲، هیچ نشانه‌ای از بار مته یا سرعت دوران بهینه وجود ندارد. در این شکل‌ها تنها اثر بار مته و سرعت دوران بر نرخ حفاری نشان داده شده است. با این حال باید بار مته و سرعت دورانی را استفاده کرد که حداقل هزینه را به دلار در فوت داشته باشند [Moore, 1986]. مورر^۱، در معادله‌ی نظری خود برای مته‌های مخروط چرخشی به رابطه‌ی نرخ نفوذ با بار مته، سرعت دوران، اندازه‌ی مته و مقاومت سنگ می‌پردازد. این معادله از مشاهده‌ی مستمر رفتار یک دندانه در شرایط اعمال فشار مشتق شده است.

۱- حجم فرورفتگی در زیر عنصر بُرنده متناسب با مربع عمق نفوذ آن است.

۲- عمق نفوذ عنصر برنده رابطه‌ی معکوس با مقاومت سنگ دارد.

در این شرایط، نرخ نفوذ R بصورت زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{K}{S^2} \left[\frac{W}{d_b} - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t \right]^2 N \quad (1-2)$$

که در آن، K : ثابت تناسب، S : مقاومت فشاری سنگ، W : بار مته، W_t : بار آستانه‌ای مته، d_b : قطر مته، و N : سرعت دوران است. این رابطه‌ی نظری با فرض پاکسازی کامل ته چاه و فرو رفتن کامل دندانه مته در سازند برقرار است. درستی رابطه‌ی نظری مورر را می‌توان با استفاده از داده‌های تجربی بدست آمده در مقادیر نسبتاً کم بار مته و سرعت دوران متناظر با بخش ab شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۳ اثبات نمود [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۲-۵- گشتاور^۲

گشتاور اندازه‌گیری شده در سطح زمین عبارتست از نیروی مورد نیاز برای حفظ دوران رشته‌ی حفاری. نیروهای زیادی در چرخش رشته‌ی حفاری دخالت دارند. بعضی از آنها به پارامترهای مکانیکی (بار روی مته، سرعت دوران مته، قطر و نوع مته) و برخی دیگر به مشخصات سازند (مقاومت در مقابل کشش) مربوط می‌شوند. چیزی که کارشناسان به آن علاقه دارند گشتاور خود مته (گشتاور مؤثر)

1- Maurer

2- Torque

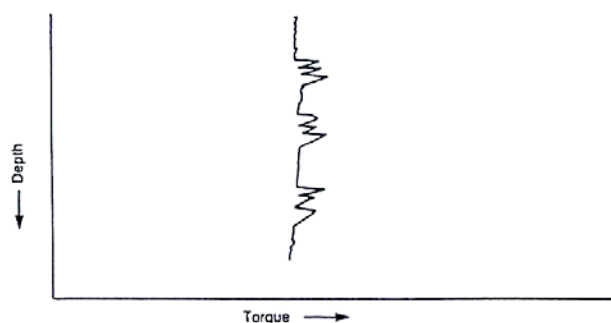
است که در انتقال از میز دوار به مته بدلیل اینرسی و سایش (خصوصاً در عمق قرارگیری پایدارساز^۱) به صورت مؤثری کاهش پیدا می‌کند. این مشکل در چاه‌های زاویه‌دار و افقی بسیار جدی‌تر است [Nguyen, 1996].

۲-۴-۲-۵-۱ هدف از اندازه‌گیری گشتاور

تغییر در مقدار میانگین گشتاور، حفار را از وضعیت مته و بخصوص یاتاقان‌ها خبردار می‌کند.

تغییرات مکرر (شکل ۲-۱۴) می‌تواند معانی زیر را داشته باشد [Nguyen, 1996]:

- مشکلات مرتبط با چسبیدن یا گیر کردن مخروط مته
- تخریب یا فروریختن سازند در بالای مته
- زمین‌شناس نیز به تغییرات گشتاور به دلایل زیر علاقه‌مند است [Nguyen, 1996]:
- تشخیص تغییرات لیتولوژی
- تعیین زمان بیرون آوردن مته از چاه
- آگاهی از افق‌های با تراکم یا فشردگی غیر عادی
- تعیین موقعیت سازندهای شکسته شده‌ی احتمالی (وقتی که تغییرات گشتاور ناگهانی باشد).



شکل ۲-۱۴- تغییرات ناگهانی گشتاور با عمق [Moore, 1986]

یکی از روش‌های متداول در تعیین زمان بیرون آوردن مته گشتاور حفاری است. استفاده از این راهکار منوط به داشتن یک دستگاه خوب برای اندازه‌گیری گشتاور است و همینطور تشخیص اپراتور در این که افزایش میزان گشتاور به دلیل قفل شدن یاتاقان‌هاست و نه تغییر در سازندها [Moore,1986].

۲-۴-۶- فرسودگی دندانهای مته^۱

در بیشتر مته‌ها بدلیل فرسودگی دندان در جریان کار، حفاری کندتر می‌شود. طول دندان در مته‌های مخروطی چرخشی دندان کنگره‌ای به طور پیوسته در اثر ساییدگی و پوسته‌شدگی^۲ کاهش می‌یابد. دندانها را با فرآیندهای روکش‌دهی سطحی^۳ یا سخت‌گردانی^۴ به صورتی تغییر می‌دهند که قابلیت خود تیزشوندگی^۵ آنها ارتقاء پیدا کند. هر چند، این کار به حفظ حالت تیزی نوک دندان کمک می‌کند ولی نمی‌تواند طول کاهش یافته‌ی دندان را جبران نماید. دندانهای دکمه‌ای شکل کربید تنگستن مته‌های مخروط چرخشی بیشتر در اثر شکسته شدن از بین می‌روند تا ساییدگی. وقتی که شکستگی رخ می‌دهد غالباً کل دندان از بین می‌رود. کاهش نرخ نفوذ بدلیل فرسودگی مته در مته‌های دندان کنگره‌ای معمولاً به شدت مته‌های دکمه‌ای نیست مگر آن که تعداد زیادی از دندانها در جریان کار مته شکسته شده باشند. مته‌های الماسی نیز در اثر شکستگی دندان یا جدا شدن الماس‌ها از بدنه‌ی مته دچار نقصان می‌شوند [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۱۵- راهنمای فرسودگی دندان در مته‌های دندان کنگره‌ای [Bourgoyne et al, 1991]

- 1- Bit tooth wear
- 2- Chipping
- 3- Hardfacing
- 4- Case-hardening
- 5- Self-sharpening

محققان زیادی مدل‌های ریاضی را برای محاسبه‌ی تاثیر فرسودگی دندان به نرخ نفوذ در مته‌های

مخروط چرخشی ارائه کرده‌اند. گال و وودز^۱ مدل زیر را در ۱۹۶۳ ارائه کردند.

$$R \propto \left(\frac{1}{0.928125h^2 + 6h + 1} \right)^{a_v} \quad (2-2)$$

که در آن h ارتفاع کسری دندان^۲ است که فرسوده شده و a_v توان یا نمایه‌ی^۳ آن است [Bourgoyne et al, 1991].

مقدار ۰/۵ برای نمایه‌ی a_v برای فرسودگی خود تیزشونده‌ی مته‌های دندان کنگره‌ای یعنی اولین نوع مته‌ی مورد بحث پیشنهاد شده است. در کارهای جدیدتر، بورگوین و یانگ رابطه‌ای مشابه اما با پیچیدگی کمتر را ارائه دادند.

$$R \propto e^{-a_v h} \quad (3-2)$$

بورگوین و یانگ پیشنهاد دادند که نمایه‌ی a_v بر اساس مشاهده‌ی کاهش نرخ نفوذ با فرسودگی دندان در دوره‌ی کاری مته‌های قبلی تحت شرایط مشابه تعیین گردد [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۳- عوامل هیدرولیکی مؤثر بر نرخ حفاری

همانطور که می‌دانید امروزه در حفاری چاه‌های نفت و گاز، سیال حفاری یا اصطلاحاً گل حفاری با توجه به وظایفی که بر عهده دارد، نقشی تعیین کننده در پیشبرد عملیات حفاری داشته و لذا انتخاب نوع گل حفاری و خصوصیات آن و اطلاع از نحوه‌ی تأثیر آن بر نرخ حفاری از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین در ابتدا به انواع سیالات حفاری و وظایف آنها اشاره‌ای کوتاه شده و بعد چگونگی تأثیر آنها مورد بحث قرار خواهد گرفت.

1- Galle and Woods
2- Fractional tooth height
3- Exponent

۲-۴-۳-۱- انواع سیالات حفاری

طبقه‌بندی‌های زیادی در مورد سیالات حفاری صورت گرفته که پرداختن به آنها خارج از موضوع این تحقیق است. بنابراین تنها به ذکر یک طبقه‌بندی کلی که تلفیقی از طبقه‌بندی ربیعا [Rabia, 1991] و دیگران است اکتفا می‌گردد.

- گل‌های آب- پایه^۱
- گل‌های نفت- پایه^۲
- گل‌های امولسیون^۳
- سیالات حفاری گازی^۴

۲-۴-۳-۲- وظایف سیال حفاری

سیال حفاری در فرآیند حفاری دورانی برای انجام وظایف زیر استفاده می‌شود: (۱) انتقال خرده‌های حفاری به سطح زمین، (۲) ایجاد فشار ایستایی مناسب در مقابل فشار منفذی سازند برای پیشگیری از هجوم سیالات سازند به درون چاه، (۳) پایدارسازی دیواره‌های چاه و جلوگیری از تغییرات مشکل‌ساز در اندازه‌ی چاه، (۴) خنک‌کاری و روانکاری مته، (۵) روانکاری رشته‌ی حفاری و جلوگیری از لرزش‌های شدید آن، (۶) معلق نگه داشتن خرده‌های حفاری در فضای حلقوی به هنگام از کار افتادن پمپ گل، (۷) جلوگیری از داخل شدن سیال حفاری به درون سازند با تشکیل اندودی روی دیواره‌ی چاه، و (۸) انتقال قدرت به موتور ته‌چاهی (در حفاری زاویه‌دار یا حفاری با مته الماسی). علاوه بر ارائه‌ی وظایف گفته شده، سیال حفاری نباید (۱) مانعی بر سر راه کسب اطلاعات درباره‌ی سازندها ایجاد کند (مختل نکردن روش‌های ارزیابی سازند)، (۲) موجب بروز هیچ گونه اثرات منفی بر روی سازند حفر شده گردد، یا (۳) باعث خوردگی یا زنگ‌زدگی^۵ تجهیزات حفاری و لوله‌های زیر سطحی شود [Bourgoyne et al, 1991; Nguyen, 1996; Rabia, 1991].

1- Water-base muds

2- Oil-base muds

3- Emulsion muds

4- Gaseous drilling fluids

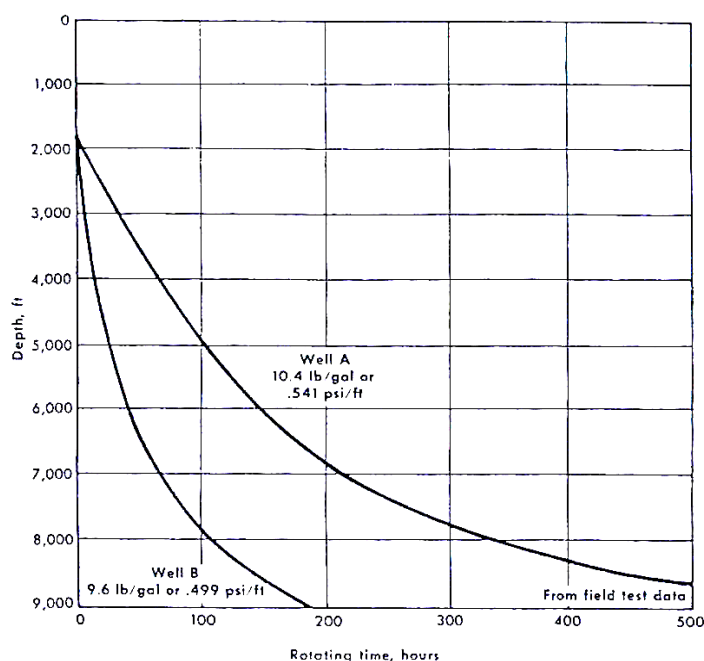
5- Corrosion

۲-۴-۳- خصوصیات سیال حفاری

برخی خصوصیات سیال حفاری که تأثیر آنها بر نرخ نفوذ در این تحقیق آمده است عبارتند از (۱) وزن مخصوص، (۲) جامدات همراه و نوع آنها، (۳) خصوصیات سیال‌شناختی (روان‌رَوَندگی) جریان^۱، (۴) مشخصات تراویدگی، (۵) فاز سیال و (۶) ترکیب شیمیایی.

۲-۴-۳-۱- وزن مخصوص گل^۲

افزایش وزن گل، در صورت تغییر نکردن فشار منفذی نرخ حفاری را کاهش می‌دهد. دلیل احتمالی این مسئله، فشردگی سازند درست در زیر مته می‌باشد. اگر فشردگی سازند دلیل اصلی تأثیر وزن گل روی نرخ حفاری باشد، پیداست که تأثیرات وزن گل منوط به نوع سازند تحت حفاری خواهد بود. در سازندهای نرم شیلی، اگر وزن گل بدون افزایش فشار منفذی زیاد شود، نرخ حفاری به شکل قابل محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در سازندهای سخت مانند چرت، دولومیت و آهک متراکم، افزایش وزن گل، نرخ حفاری را کاهش می‌دهد اما تأثیرش خیلی کمتر از آن چیزی است که در مورد شیل‌های نرم گفته شد [Moore, 1986].



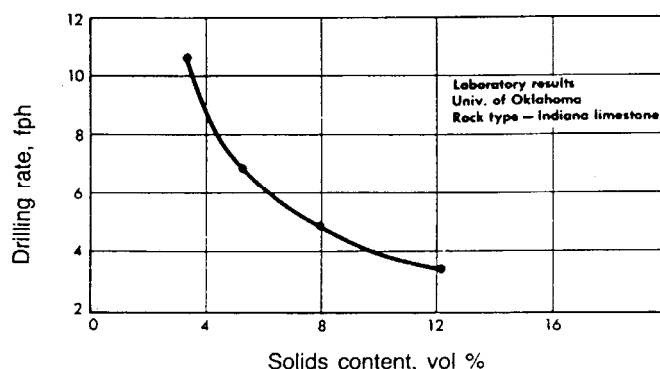
شکل ۲-۱۶- تأثیر وزن گل بر زمان حفاری [Moore, 1986]

- 1- Rheological flow properties
- 2- Mud weight

نتایج بدست آمده از حفاری با مته‌ی مخروط چرخشی ۱/۲۵ اینچی و گل رس/ آب در سنگ‌آهک ایندیانا^۱ با نفوذ پذیری ۸ تا ۱۰ میلی داری در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. ظاهراً آسیب‌دیدگی سازند زیر مته در نتیجه ته‌نشست کیک گل بوجود می‌آید و جامدات سازند مانع جریان کافی تراویده‌ی گل در جلوی مته برای تعدیل اختلاف فشار می‌شود. باید توجه داشت که تأثیر عدم تعادل بر نرخ حفاری در مقادیر کم عدم تعادل نسبت به مقادیر زیاد آن بیشتر دیده می‌شود. اگر عدم تعادل خیلی بزرگ باشد، افزایش بیشتر آن اساساً تأثیری روی نرخ حفاری نخواهد داشت [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۳-۳-۲- جامدات همراه گل و نوع آنها^۲

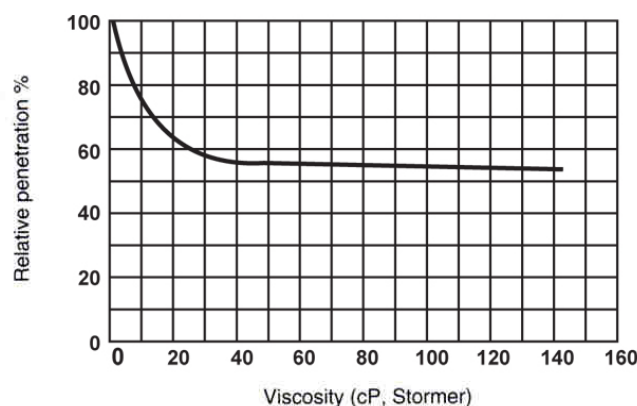
مشکل بتوان اثر جامدات همراه گل روی نرخ حفاری را از اثر وزن گل تفکیک کرد. هر قدر جامدات همراه گل افزایش پیدا کند، وزن گل نیز بالا خواهد رفت. بنابراین تأثیر همزمان هر دو معمولاً وجود دارد. با این حال، نرخ‌های حفاری با آب شور اشباع ۱۰ پوند بر گالن از نرخ‌های حفاری با گل ۱۰ پوند بر گالن در همان شرایط به شکل قابل توجهی بیشتر است [Moore, 1986]. آزمایش‌هایی نظیر شکل ۲-۱۸ در آزمایشگاه و بدون هیچ‌گونه تغییری در فشار ایستابی انجام می‌گیرند. همانطور که ملاحظه می‌کنید، نرخ حفاری با ۲٪ حجمی ذرات جامد، ۱۱ فوت در ساعت و با ۱۲٪ حجمی ذرات جامد، ۳ فوت در ساعت است [Moore, 1986].



شکل ۲-۱۸- تأثیر کمی جامدات گل بر نرخ حفاری [Moore, 1986]

1- Indiana limestone
2- Solids content and type

هر چه سیال گرانش‌تر (لزج‌تر) باشد، با سهولت کمتری می‌تواند داخل حفرات و شکافهای کوچک ایجاد شده بوسیله‌ی مته شود و در نتیجه کمتر می‌تواند در کندن سازند مشارکت کند [Nguyen, 1996]. شکل ۲-۲۰ تأثیر گرانش روی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۰ تأثیر گرانش روی نرخ نفوذ [Nguyen, 1996]

۲-۴-۳-۴- تراویدگی^۱

گل حفاری معمولاً از یک فاز مایع و ذرات معلق غالباً رسی ساخته می‌شود. اگر قطر منافذ یک سازند متخلخل و نفوذپذیر که در تماس با گل حفاری دارای فشار ایستابی مشخص قرار گرفته کوچکتر از بعضی ذرات معلق گل باشد، تراویدگی بوجود می‌آید، یعنی ذرات رس بر روی دیواره‌ی چاه باقی خواهند ماند، کیک گل^۲ تشکیل خواهد شد و مایع (تراویده‌ی گل^۳) به درون سازند فرو خواهد رفت [Nguyen, 1996].

تأثیر نرخ تراویدگی به خوبی مشخص نیست. وزن مخصوص‌ها و گرانش‌های کم که معمولاً با تراویده‌ی قابل توجهی همراه هستند، در مواردی که ثبت شده به نظر می‌رسد موجب بهبود حفاری شده‌اند [Nguyen, 1996].

این مفهوم که نرخ‌های حفاری با افزایش نرخ‌های تراویدگی بالا می‌رود اولین بار توسط پرسنل عملیاتی مطرح گردید. حفارها متوجه شدند که وقتی نرخ‌های تراویدگی پایین می‌آید، نرخ‌های حفاری

1- Filtration rate
2- Filter cake
3- Mud filtrate

نیز کاهش پیدا می‌کند. به احتمال زیاد این کاهش نرخ حفاری بیشتر نتیجه‌ی مواد افزودنی برای کاهش نرخ تراویدگی است تا کاهش نرخ تراویدگی به خودی خود [Moore,1986].

مشخصات تراویدگی، وزن مخصوص و حجم جامدات همراه گل، نقش مهمی را در کنترل اختلاف فشار بخش‌های خُرد شده‌ی سنگ در زیر مته به عهده دارند [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۳-۳-۵- فاز سیال^۱

فاز سیال می‌تواند به شکل اساسی روی نرخ حفاری تاثیر بگذارد. هوا و گاز از وزن کمی برخوردار هستند و استفاده از آنها به عنوان سیال حفاری موجب افزایش نرخ حفاری خواهد شد. استفاده از آب یا نفت در ساختار گل همواره بحث برانگیز بوده است. اگر برای حفاری از مته‌های سنگتراش یا مته‌های الماسی خوش‌ساخت استفاده شود، نرخ‌های حفاری با گل‌های نفت-پایه‌ی پیوسته کمتر از نرخ‌های حفاری با گل‌های آب-پایه است. بهبود نرخ‌های حفاری با گل‌های نفت-پایه از طریق کاهش جامدات کم چگالی همراه گل و در نتیجه افزایش نرخ تراویدگی امکان‌پذیر می‌باشد. در مورد PCD که گاهاً مته‌های Stratapax[®] نامیده می‌شوند، نرخ‌های حفاری در گل‌های نفت-پایه بالاتر از گل‌های آب-پایه است [Moore,1986].

آنچه که در مورد اثر گل‌های نفت-پایه روی نرخ‌های حفاری با مته‌های سنگتراش گفته شد، احتمالاً از این واقعیت ناشی می‌شود که مقاومت برشی نفت در هنگام عبور از درون مته همانند آب نیست. وضعیت متفاوتی که در مورد مته‌های PCD وجود دارد، به دلیل بهبود روانکاری زیر مته در موقع استفاده از نفت به جای آب است [Moore,1986].

بطور کلی، تجربه نشان داده که نفت اضافه شده به گل حفاری، نرخ نفوذ را بالا برده است. از طرفی خاصیت روانکاری نفت، عمر یا تاقان‌های مته را افزایش می‌دهد [Nguyen, 1996].

1- Fluid phase

۲-۴-۳-۶- ترکیب شیمیایی گل^۱

از تأثیر ترکیب شیمیایی سیال بر نرخ نفوذ نیز نباید به سادگی گذشت به طوری که سرعت آبدار شدن و گل‌گرفتگی مته در بعضی مواد رسی تحت تأثیر ترکیب شیمیایی سیال است [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۴-۳-۴- نرخ جریان^۲ سیال حفاری

همانطور که قبلاً گفته شد، نرخ نفوذ به نسبت مستقیم با بار روی مته افزایش می‌یابد. در یک نرخ جریان معین، اگر بار روی مته بتدریج افزایش پیدا کند، ممکن است زمانی پیش بیاید که نرخ نفوذ دیگر با بار روی مته متناسب نباشد. حتی ممکن است با اعمال بار بیشتر روی مته کاهش پیدا کند. زمانی که دیگر نسبت مستقیمی بین نرخ نفوذ و بار برقرار نباشد، پدیده‌ای بنام نقطه‌ی گل‌گرفت^۳ اتفاق می‌افتد [Nguyen, 1996].

با عبور از این نقطه، دیگر نرخ جریان آنقدر کافی نیست که بتواند همه‌ی خرده‌های حفاری را همانطور که بوسیله‌ی دندان‌های مته تولید می‌شوند پاکسازی کند. گل‌گرفتی را می‌توان با افزایش سرعت سیال در نازل‌های مته و در نتیجه حفظ اندازه‌ی سطح تمیز کننده‌ی مته به تأخیر انداخت [Nguyen, 1996].

بنابراین نرخ جریان روی نرخ نفوذ اثر دارد اما این اثر فقط تا حد مشخصی وجود دارد. بیش از این مقدار ممکن است برعکس باعث افزایش مسئله‌ساز اندازه‌ی چاه و فرسایش دیواره‌ی چاه در مقطعی که طوق حفاری قرار دارد شود. حتی زمانی که حفار می‌خواهد شروع گل‌گرفتگی مته را به تأخیر بیندازد، نباید نرخ جریان را طوری در نظر بگیرد که [Nguyen, 1996]:

- در سازندهای نرم خطر تخریب بوجود می‌آید.

1- Chemical composition
2- Flow rate
3- Balling up point

- دیواره‌های چاه در سازندهای تحکیم‌نیافته بخاطر نرخ‌های بالای جریان گل فرسایش یابد. فرسایش وقتی می‌تواند در دسرساز باشد که قطر معینی از چاه برای رسیدن به حداکثر کارایی رشته‌ی حفاری مورد نیاز باشد.
- افزایش افت فشار را در فضای حلقوی بدنبال داشته باشد زیرا همان تأثیری را دارد که افزایش وزن مخصوص گل در عمق قرارگیری مته ایجاد می‌کند و در نتیجه موجب کاهش نرخ حفاری می‌گردد.
- سازندها در معرض خطر شکستگی قرار بگیرند که علت آن افزایش افت فشارهای مازاد بر فشار ایستابی است و در نهایت به هرزروی گردش گل می‌انجامد.

۲-۴-۳-۵- هیدرولیک مته^۱

با معرفی مته‌های مخروط چرخشی جت‌دار در ۱۹۵۳ بهبود چشمگیری در نرخ نفوذ بواسطه‌ی بهبود عملکرد مته در پاشاندن سیال حاصل شد. بهبود عملکرد مته در پاشاندن سیال علاوه بر پاکسازی بهتر ته چاه، پاکسازی بهتر دندانه‌های مته را هم بدنبال داشت [Bourgoyne et al, 1991].

تردیدهای زیادی در انتخاب بهترین پارامتر هیدرولیکی که نشان دهنده‌ی تأثیر هیدرولیک بر نرخ نفوذ باشد وجود دارد. توان هیدرولیکی مته^۲، نیروی وارده از جت‌ها^۳ و سرعت نازل^۴ (عدد رینولدز) همگی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [Bourgoyne et al, 1991].

سطح هیدرولیکی که باید در مته وجود داشته باشد با توجه به میزان تأثیر آن بر نقطه‌ی افت کارایی مته مشخص می‌شود. آنچه در شکل ۲-۲۱ نشان داده شده، نمونه‌ی فرضی از نوع رفتاری است که اغلب گزارش می‌شود. در مقادیر کم بار مته و نرخ نفوذ، سطح هیدرولیک مورد نیاز برای پاکسازی چاه کم است. با اعمال بار بیشتر روی مته و تولید سریع‌تر خرده‌های حفاری، سرانجام نقطه‌ی افت کارایی مته جایی بدست می‌آید که در آن نتوان خرده‌های حفاری را با همان سرعتی که تولید

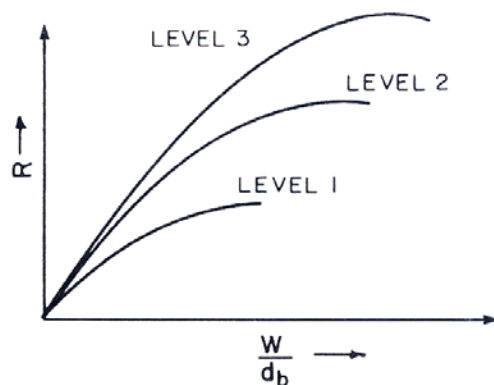
1- Bit hydraulics

2- Bit hydraulic horsepower

3- Jet impact force

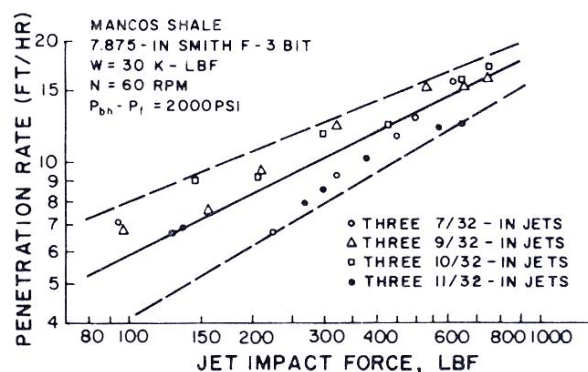
4- Nozzle velocity

می‌شوند جمع‌آوری کرد. اگر سطح هیدرولیک افزایش پیدا کند، مقادیر بالاتر بار مته و نرخ نفوذ قبل از وقوع افت کارایی مته قابل استفاده خواهد بود [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۲۱- رابطه‌ی بین هیدرولیک مته و نرخ نفوذ [Bourgoyne et al, 1991]

در توسعه‌ی رابطه‌ی بین هیدرولیک مته و نرخ نفوذ، توان هیدرولیکی و نیروی اعمالی جت‌ها خیلی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های جدید حاصل از آزمایش‌های حفاری تمام مقیاس که تحت شرایط شبیه‌سازی شده چاه انجام گرفته‌اند نشان می‌دهند که عدد رینولدز، توان هیدرولیکی و نیروی اعمالی جت همگی از نتایج مشابهی در هنگام استفاده برای بیان تأثیر هیدرولیک مته بر نرخ نفوذ برخوردارند. شکل ۲-۲۲ همبستگی بدست آمده برای نیروی اعمالی جت را برای داده‌های حاصل از حفاری در شیل‌های مَنکوس^۱ با یک مته‌ی ۷/۸۷۵ اینچی Smith F3 نشان می‌دهد [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۲۲- تأثیر نیروی وارده‌ی جت بر نرخ نفوذ [Bourgoyne et al, 1991]

1- Mancos

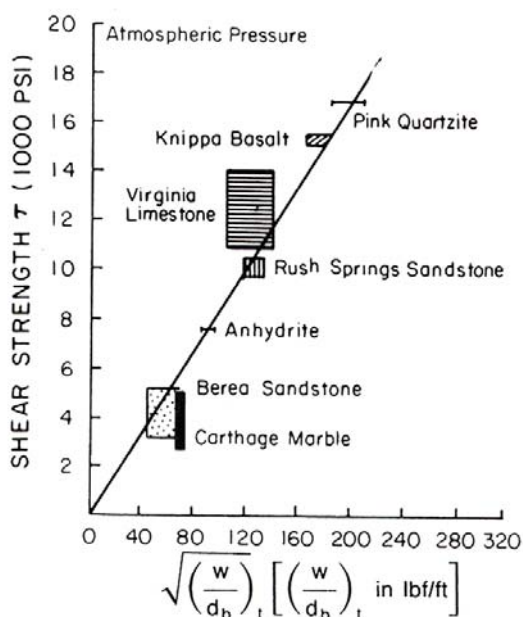
۲-۵- عوامل غیر قابل کنترل یا عوامل محیطی مؤثر بر نرخ حفاری

این عوامل از جانب محیط حفاری یعنی زمین و سازندهای تشکیل دهنده‌ی آن بر عملیات حفاری تحمیل می‌شوند و حفار در تغییر آنها نقشی ندارد.

۲-۵-۱- مشخصات سازند

حدود الاستیک و مقاومت نهایی سازند، مهمترین خصوصیات تأثیرگذار سازند بر نرخ حفاری هستند. بعضی وقت‌ها برای مشخص نمودن مقاومت سازند از مقاومت برشی پیش بینی شده توسط معیار شکست موهر استفاده می‌شود. مورر می‌گوید حجم فرورفتگی یا حفره‌ی بوجود آمده در زیر تنها یک دندان، هم با مقاومت فشاری سنگ و هم با مقاومت برشی سنگ نسبت عکس دارد. بینگهام دریافت که نیروی آستانه‌ای مورد نیاز برای شروع حفاری در یک سنگ معین در فشار اتمسفر را می‌توان با مقاومت برشی سنگ که از آزمایش فشاری در فشار اتمسفر تعیین شده مرتبط ساخت.

نیروی آستانه‌ای یا بار مته‌ی $(W/d)_t$ مورد نیاز برای شروع حفاری از رسم نرخ حفاری به عنوان تابعی از بار مته به ازای هر واحد قطر مته و سپس برونمایی برای نرخ حفاری صفر بدست می‌آید. نمودار آزمایشگاهی بدست آمده از این روش در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. نفوذپذیری سازند نیز از تأثیر قابل توجهی بر نرخ نفوذ برخوردار است. در سنگهای نفوذپذیر، تراویده‌ی سیال حفاری می‌تواند به درون سنگ جلوی مته نفوذ کرده و اختلاف فشار ناشی از خرده سنگ‌های تشکیل شده در زیر هر دندان را متعادل کند. همچنین نوع سیالات موجود در حفره‌های خالی سنگ و تأثیر آنها بر مکانیزم فوق نیز می‌تواند مورد بحث قرار گیرد، به این صورت که حجم بیشتری از تراویده‌ی گل برای متعادل نمودن فشار در یک سنگ حاوی گاز در مقایسه با یک سنگ حاوی مایع مورد نیاز خواهد بود.



شکل ۲-۲۳- رابطه‌ی بین مقاومت برشی سنگ و بار آستانه‌ای مته در فشار اتمسفر [Bourgoyne et al, 1991]

ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده‌ی سنگ نیز دارای تأثیر کمی بر نرخ نفوذ است. سنگ‌های دارای کانی‌های سخت و ساینده می‌توانند باعث کندشدگی سریع دندان‌های مته شوند و سنگ‌های حاوی کانی‌های چسبنده‌ی رسی می‌توانند موجب گل‌گرفتگی مته و حفاری با بازدهی بسیار کم شوند [Bourgoyne et al, 1991].

۲-۵-۲- فشار منفذی سازند^۱

فشار منفذی سازند عبارت است از فشاری که سیالات موجود در حفرات سازند به دیواره‌های حفرات وارد می‌کنند. فشار منفذی بخشی از وزن طبقات بالایی^۲ را پوشش می‌دهد، در حالی که بخش دیگر توسط دانه‌های سنگ مهار می‌شود. (عبارت‌های فشار منفذی، فشار سازند و فشار سیال همگی معنی یکسانی داشته و به فشار منفذی سازند بر می‌گردند) [Rabia, 1991]. بنابراین،

$$\sigma_{ob} = \sigma_z + p_f \quad (۴-۲)$$

که σ_{ob} وزن طبقات بالایی، σ_z تنش قائم دانه به دانه یا خمیره سنگ، p_f فشار منفذی سازند است.

1- Formation pore pressure

2- Overburden

سازندها بر اساس بزرگی فشار منفذی‌اشان به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- فشار منفذی نرمال سازند^۱

وقتی می‌گویند یک سازند تحت فشار نرمال است که فشار منفذی‌اش معادل فشار ایستابی یک ستون کامل آب سازند باشد. فشار منفذی نرمال معمولاً 0.465 psi/ft (0.0105 bar/m) است.

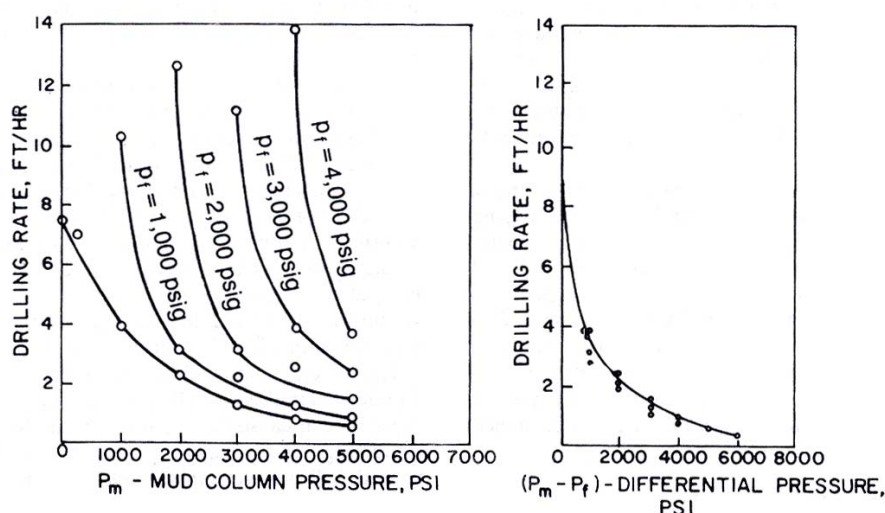
۲- فشار منفذی غیرنرمال سازند^۲

این نوع فشار در مناطقی به وجود می‌آید که ارتباط مستقیمی با طبقات مجاور خود ندارند. مرزهای منطقه‌ی دارای فشار غیرنرمال، نفوذناپذیر بوده و سیالات به دام افتاده در حفرات سازند نسبت بزرگتری از وزن طبقات بالایی را تحمل می‌کنند. حداکثر فشار منفذی غیرنرمال 1 psi/ft برای نواحی تکتونیزه‌ی آرام و 0.8 psi/ft برای نواحی فعال است [Rabia, 1991].

همانطور که پیش از این اشاره شد، معمولاً نرخ نفوذ به شکل قابل توجهی با نوع سازند تغییر می‌کند. بنابراین خیلی اوقات می‌توان نگاهی نرخ نفوذ را برای کمک به همبستگی لیتولوژی در چاه‌های نزدیک به هم و دارای فشارهای مشخص سازند استفاده کرد. علاوه بر این، نرخ نفوذ در یک نوع سازند معین به صورت طبیعی با افزایش فشار کاهش پیدا می‌کند. با این حال، در صورت برخورد با یک منطقه‌ی گذار^۳ به فشار غیرنرمال این روند عادی تغییر می‌کند. کمی بالای منطقه‌ی گذار به گرادیان فشارهای منفذی بالاتر، در بیشتر مواقع سازندی سخت و اغلب آهکی دیده می‌شود که دارای نرخ نفوذی کمتر از حالت عادی است. بیشتر افراد تصور می‌کنند که این سازندها، سازندهایی با نفوذپذیری فوق‌العاده کم هستند که سدی را برای گرادیان‌های فشار غیرنرمال تشکیل می‌دهند. ضخامت این سدها ممکن است از چند فوت تا چند صد فوت متغیر باشد. کمی زیر این پوش‌سنگ فشار غیرنرمال، نرخ نفوذ نرمال روند عکس به خود می‌گیرد و امکان دارد افزایش نرخ نفوذ با عمق مشاهده شود [Bourgoyne et al, 1991].

1- Normal formation pore pressure (or hydropressure)
2- Abnormal formation pore pressure (or geopressure)
3- Transition zone

اعتقاد بر این است که افزایش معمول نرخ نفوذ در منطقه‌ی گذار سازندهای با نفوذپذیری کم، نتیجه‌ی (۱) کاهش اختلاف فشار ته چاه و (۲) کاهش مقاومت سنگ ناشی از کم‌تراکمی^۱ باشد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد غالباً از عبارت عدم تعادل برای بیان اختلاف بین فشار ایستابی ته چاه و فشار سیال موجود در فضاهاى خالی سازند استفاده می‌شود. تأثیر عدم تعادل از اهمیت بیشتری در مقایسه با تأثیر کم‌تراکمی برخوردار است. البته در بسیاری موارد بدلیل فرسودگی مته، نرخ نفوذ در منطقه‌ی گذار همچنان با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند اما سرعت کاهش خیلی کمتر از آن چیزی است که انتظار می‌رود [Bourgoyne et al, 1991].



شکل ۲-۲۴- تأثیر فشار منفذی سازند و عدم تعادل ناشی از آن بر نرخ حفاری [Bourgoyne et al, 1991]

به جز عواملی که در این فصل مورد بحث قرار گرفتند، عوامل تأثیرگذار دیگری همچون فشار پمپ، اندازه‌ی نازل‌های مته و غیره نیز وجود دارند که در اینجا به آنها پرداخته نشده است.

1- Undercompaction



فصل سوم

مبانی شبکه‌های

عصبی مصنوعی



مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی

۳-۱- مقدمه

یکی از بارزترین ویژگی‌های مغز توانایی یادگیری آن است. مغز می‌تواند به خود آموزش دهد. یادگیری از طریق مثال، همان شیوه‌ای است که توسط آن انسان فعالیت‌هایی چون نوشتن، خوردن و آشامیدن را می‌آموزد. چنین تحولی در سیستم‌های کامپیوتری متعارف دیده نمی‌شود و آنها می‌توانند عملیاتی را که با ساختار آنها سازگاری دارند به خوبی انجام دهند. برای مثال شمارش و جمع کردن اعمالی پیایی است و یکی پس از دیگری انجام می‌شود. بطور کلی کامپیوترها طوری طراحی شده‌اند که یک عمل را پس از عمل دیگر با سرعت بسیار زیاد انجام دهند، در حالی که مغز در یک لحظه با تعداد زیادی اجزاء بطور همزمان کار می‌کند و لذا قادر است اعمالی چون دیدن و شنیدن را که اعمالی شدیداً موازی‌اند انجام دهد.

بیشتر مسائل مهندسی، خاصیت موازی دارند و نیازمند حجم زیادی از اطلاعات متفاوت هستند که باید در تقابل با یکدیگر به حل مسأله بیانجامد. شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای پاسخ به این نیاز و حل مسائلی این چنینی، با توجه به ساختار شبکه‌ی عصبی بیولوژیکی شکل گرفتند. شبکه‌های عصبی یکی از پویاترین حوزه‌های تحقیق در دوران معاصر می‌باشد که افراد متعددی از رشته‌های گوناگون علمی را به خود جلب کرده است. هر کدام از این افراد پشتوانه‌ی علمی متفاوتی را بر این حوزه افزوده‌اند [البرزی، ۱۳۸۰؛ منهاج، ۱۳۷۹].

۳-۲- شبکه عصبی بیولوژیکی

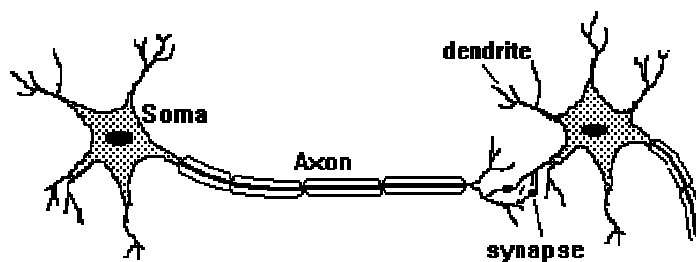
در سیستم عصبی بیولوژیکی، نرون (سلول عصبی)^۱ به عنوان اصلی‌ترین عنصر پردازش شناخته شده است. بطور کلی در بدن انسان در حدود ۱۰۰ تریلیون نرون وجود دارد که تمام آن‌ها مطابق

1- Neuron (Nervous cell)

شکل ۱-۳ از یک بدنه (سوما)^۱، آکسون^۲ و تعدادی دندريت^۳ تشكيل شده‌اند. دندريت‌ها نقش اتصالاتی را دارند که ورودی‌ها را به نرون‌ها می‌رساند. آکسون رشته باریک و بلندی است که بر خلاف دندريت از نظر الکتریکی فعال بوده و به یک سری شاخه منتهی می‌شود که انتهای این شاخه‌ها به دندريت‌های سلول‌های دیگر وصل می‌شود. در واقع این تماس به صورت مستقیم نمی‌باشد، بلکه هر آکسون از دندريت‌های سلول‌های مجاور توسط فاصله کوچکی موسوم به سیناپس^۴ جدا می‌شود.

ارتباط بین نرون‌ها و انتقال اطلاعات در سیستم عصبی زیستی یک فرآیند الکتروشیمیایی است. نرون از هر یک از اتصالات ورودی خود یک ولتاژ کم را توسط سیگنال‌های عصبی، دریافت می‌کند و آن‌ها را با هم جمع می‌کند. اگر این مقدار به مقدار آستانه برسد نرون آتش می‌کند و ولتاژی را تحت عنوان پتانسیل فعالیت^۵ در طول آکسون خود منتشر می‌نماید و آکسون نیز با توجه به شدت آن، ممکن است یک سیگنال را توسط سیناپس و با آزاد شدن ماده‌ای شیمیایی به نام انتقال دهنده‌ی عصبی^۶، به دندريت نرون‌های دیگر بفرستد یا این که به دلیل ضعیف بودن آن، هیچگونه سیگنالی را عبور ندهد. در واقع پاره‌ای سیناپس‌ها، باعث تحریک دندريت‌ها شده و پاره‌ای دیگر آنها را از تحریک باز می‌دارند. این به معنای تغییر پتانسیل محلی دندريت‌ها در جهت مثبت یا منفی می‌باشد.

هر نرون دارای توانایی تطبیق‌پذیری می‌باشد. این تطبیق‌پذیری چیزی جز تقویت و تضعیف اتصالات سیناپسی نمی‌باشد [البرزی، ۱۳۸۰؛ طهماسبی، ۱۳۸۳].



شکل ۱-۳- نرون بیولوژیکی [www.ii.metu.edu.tr, 2007]

- 1- Cell body (Soma)
- 2- Axon
- 3- Dendrite
- 4- Synapse
- 5- Action Potential (AP)
- 6- Neurotransmitter

۳-۳- شبکه عصبی مصنوعی

دانشمندان با بررسی عملکرد شبکه عصبی بیولوژیکی و شناخت ویژگی‌های آن، سعی در پیاده کردن این ویژگی‌ها در یک شبکه عصبی مصنوعی کردند. مهمترین ویژگی‌های شبکه عصبی بیولوژیکی که شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز آنها را دارا می‌باشند، عبارتند از:

۱- قابلیت یادگیری^۱

۲- قابلیت تعمیم پذیری^۲ (انطباق ورودی‌ها با خروجی‌های مربوطه)

۳- پردازش موازی^۳

۴- پایداری^۴

یکی از اولین نرون‌های مصنوعی که مدلی ساده از رفتار نرون بیولوژیکی می‌باشد، نرونی است که در شکل ۳-۲- الف آمده و توسط وارن مک‌کالچ و والتر پیتس^۵ در ۱۹۴۳ معرفی شده است. در مقایسه آن با نرون بیولوژیکی، وزن‌ها ($w_1, w_2, \dots, w_n$) معادل سیناپس‌ها می‌باشد، که در ورودی‌ها ($x_1, x_2, \dots, x_n$) ضرب شده و وارد بدنه نرون می‌شوند و در آن جا یک عمل جمع ساده روی آن‌ها صورت می‌گیرد. با عبور نتیجه این جمع (sum) از یک تابع خطی یا غیر خطی، خروجی نرون (y) تعیین می‌شود [طهماسبی، ۱۳۸۳].

$$y = f(sum) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad (۱-۳)$$

$f(sum)$ که تابع فعالیت^۶ یا محرک نامیده می‌شود، میزان فعالیت یک نرون را تعیین می‌کند. در نرون مک‌کالچ - پیتس (M-P) از یک تابع آستانه‌ای^۷ باینری (تابع علامت یا تابع هوی ساید^۸) استفاده شده است. در مقایسه با مقدار آستانه‌ای تابع محرک اگر حاصل جمع بدست آمده از میزان آستانه (T) تجاوز کند، نرون فعال شده و اصطلاحاً آتش می‌کند که در این صورت خروجی نرون مساوی «۱»

1- Ability of learning

2- Generalization

3- Parallel processing

4- Stability

5- Warren McCulloch and Walter Pitts

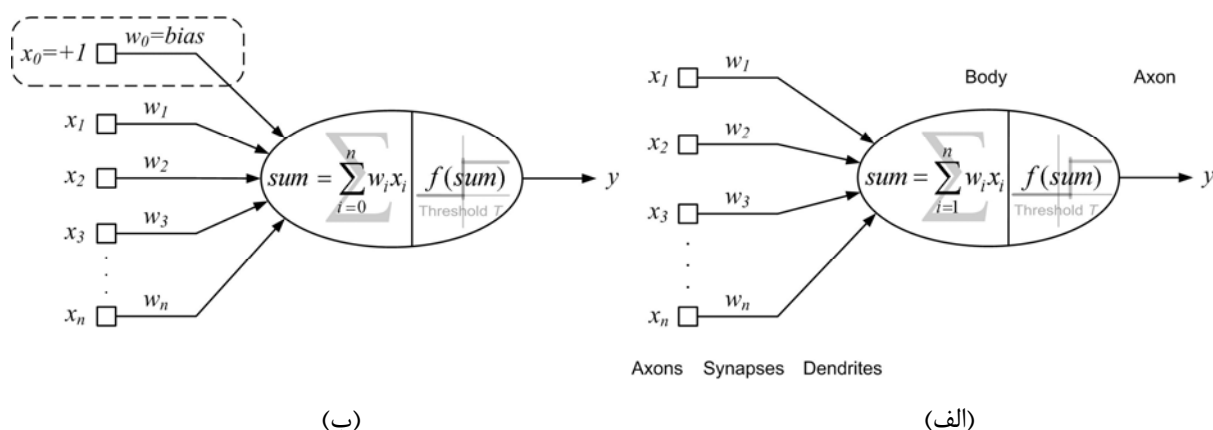
6- Activation function

7- Threshold function

8- Signum function or Heaviside function

خواهد بود و اگر حاصل جمع بدست آمده کم‌تر از آستانه باشد، نرون غیرفعال باقی مانده یا اصطلاحاً آتش نمی‌کند و خروجی مساوی صفر می‌شود.

$$y = f(\text{sum}) = \begin{cases} 1 & \text{for } \text{sum} \geq T \\ 0 & \text{for } \text{sum} < T \end{cases} \quad (2-3)$$



شکل ۲-۳- نرون مصنوعی مک کالچ - پیتس

[اصلاح شده از Principe et al, 2000; Zaknich, 2003]

از طرف دیگر می‌توان مقدار آستانه را ابتدا از حاصل جمع وزنی بدست آمده کم کرد و آنگاه مقدار حاصل را با صفر مقایسه کرد. اگر مقدار حاصل مثبت بود خروجی نرون ۱ و در غیر این صورت صفر خواهد بود.

$$y = f(\text{sum}) = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - T\right) \quad (3-3)$$

$$y = f(\text{sum}) = \begin{cases} 1 & \text{for } \text{sum} \geq 0 \\ 0 & \text{for } \text{sum} < 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

راه دیگری برای دستیابی به همین منظور می‌تواند حذف کامل آستانه از بدنه‌ی نرون و در عوض اضافه کردن یک ورودی (x_0) با مقدار ثابت ۱ باشد. این ورودی همیشه فعال باقی می‌ماند و ضریب وزنی خط ارتباطی آن برابر با مقدار منفی آستانه ($w_0 = -T$) در نظر گرفته می‌شود. در این صورت به مقدار w_0 یا حاصل ضرب آن در x_0 ($b = w_0 x_0$)، بایاس^۱ گفته می‌شود.

1- Bias

$$y = f \left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b \right) \quad (5-3)$$

$$y = f \left(\sum_{i=0}^n w_i x_i \right) \quad (6-3)$$

شکل ۳-۲- ب، نرون مک‌کالچ - پیتس را در صورت وجود بایاس نشان می‌دهد [البرزی، ۱۳۸۰؛ طهماسبی، ۱۳۸۳؛ Principe et al, 2000].

۳-۴- تاریخچه شبکه‌های عصبی مصنوعی

پیش زمینه‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم بر می‌گردد. در این دوره، کارهای اساسی در فیزیک، روانشناسی و نرووفیزیولوژی^۱ توسط دانشمندانی چون هرمان فون هلمهلتز^۲، ارنست ماخ^۳ و ایوان پاولف^۴ صورت پذیرفت. این کارهای اولیه عموماً بر تئوری‌های کلی یادگیری، بینایی و شرطی تاکید داشته‌اند و اصلاً به مدل‌های مشخص ریاضی عملکرد نرون‌ها اشاره‌ای نداشته‌اند.

وارن مک‌کالچ و والتر پیتس (۱۹۴۳) برای اولین بار عملکرد مغز را توسط روابط ریاضی نشان دادند. دونالد هب^۵ این مسیر را ادامه داد و سرانجام فرانک روزنبلات^۶ و همکارانش (۱۹۵۸) شبکه پرسپترون^۷ را معرفی کردند که این شبکه قادر به شناسایی الگوها از یکدیگر بود. برنارد ویدرو^۸ (۱۹۶۰) طرح روزنبلات را توسعه داد و شبکه آدالاین^۹ با قانون فراگیری جدید را ارائه داد. هر دوی این شبکه‌ها، پرسپترون و آدالاین، دارای این محدودیت بودند که توانایی طبقه‌بندی الگوهایی را داشتند که به طور خطی از هم متمایز می‌شدند. ویدرو و روزنبلات هر دو از این امر آگاه بودند. آن‌ها

1- Neuro-physiology

2- Helmholtz

3- Ernst Mach

4- Ivan Pavlov

5- Donald Hebb

6- Frank Rosenblatt

7- Perceptron

8- Bernard Widrow

9- ADALINE

توانستند شبکه‌های چند لایه را مطرح نمایند، لکن نتوانستند الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های تک لایه را بهبود بخشند.

کایانلو^۱ (۱۹۶۱) شبکه‌ای را عرضه کرد که شامل داده‌های متغیر با زمان بود. تئو کوهونن^۲ و جیمز اندرسون^۳ (۱۹۷۲) شبکه‌های جدیدی را عرضه کردند که به عنوان عناصر ذخیره ساز عمل می‌کرد. در همین دهه استفان گروسبرگ^۴ روی شبکه‌های عصبی خودسازمانده^۵ کار کرد. فعالیت در زمینه شبکه‌های عصبی در دهه ۶۰ قرن بیستم در قیاس با دهه‌ی ۸۰ به علت عدم بروز ایده‌های جدید و نبود کامپیوترهای سریع جهت پیاده سازی کمرنگ می‌نمود. جان هاپفیلد (۱۹۸۲) شبکه‌های برگشتی (پسخور^۶) را معرفی کرد و دیوید رامله‌هارت^۷ و جیمز مک کلند^۸ در سال ۱۹۸۶ شبکه‌ی عصبی پس انتشار^۹ خطا را ارائه دادند که تولدی دوباره برای شبکه‌های عصبی به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر شبکه‌های عصبی در دو جهت تئوری و عملی توسعه بسیاری داشته است و این روند رشد در دوره‌هایی بسیار سریع و در دوره‌هایی کند بوده است و همچنان ادامه دارد. در طی این توسعه، ساختارها و روش‌های یادگیری جدید ارائه می‌شود [منهاج، ۱۳۸۱].

۳-۵- ساختار شبکه عصبی

تمام شبکه‌های عصبی حداقل در سه مؤلفه اصلی مشترک هستند.

۱- نرون یا گره یا واحد پردازش^{۱۰} (PE)

۲- وزن‌های ارتباطی

۳- لایه‌های مجزایی که شامل نرون‌ها هستند و توسط وزن‌ها به هم مرتبط می‌شوند.

1- Caianeillo

2- Teo Kohonen

3- James Anderson

4- Stephan Grossberg

5- Self-Organized

6- Feedback

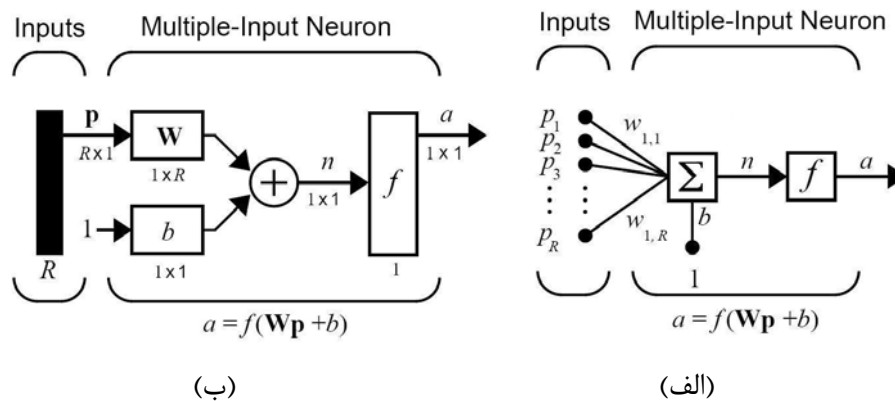
7- David Rumelhart

8- James McClelland

9- BackPropagation Neural Network (BPNN)

10- Processing Element (PE)

نرون‌ها به عنوان واحدهای محاسباتی پایه، اساس عملکرد شبکه‌ها را تشکیل می‌دهند. نرون‌ها شامل بردار ورودی، ماتریس وزنی، بایاس و تابع محرک می‌باشند (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- الف: مدل یک نرون با چند ورودی ب: فرم خلاصه شده‌ی نرون با چند ورودی
[راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲]

حاصل ضرب بردار ورودی ($\mathbf{p}$) و ماتریس وزنی ($\mathbf{W}$) و جمع آن با جمله بایاس (b) تشکیل ورودی خالص (n) را برای تابع محرک (f) می‌دهد. خروجی تابع محرک میزان فعالیت نرون را مشخص می‌کند.

$$n = \sum_{i=1}^R w_{li} p_i + b = \mathbf{W} \cdot \mathbf{p} + b, \quad act_1 = f_1(n) \quad (7-3)$$

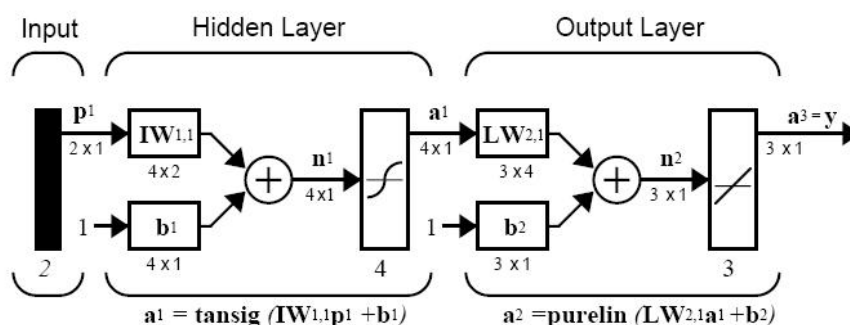
$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_R]^T \quad \mathbf{W} = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1R}]$$

که (p_i) مؤلفه‌های بردار ورودی، (w_{li}) مؤلفه‌های ماتریس وزن، (act_1) میزان فعالیت اولین نرون را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که اندیس اول در نمایش ماتریسی وزن به شماره خود نرون و اندیس دوم به مبدأ سیگنال ورودی اشاره می‌کند. در این حالت چون تنها یک نرون داریم، ماتریس وزن ($\mathbf{W}$) یک بردار سطری می‌باشد. بنابراین، ستون‌های ماتریس وزن بیانگر تعداد ورودی‌ها به یک نرون و سطرهای آن بیانگر تعداد نرون‌ها می‌باشد. در واقع ستون‌ها و سطرها به ترتیب ابتدا و انتهای یک خط ارتباطی را مشخص می‌کنند [منهاج، ۱۳۷۹].

با توجه به ساختمان کلی شبکه، الگوریتم کنترل و الگوریتم‌های یادگیری می‌توان انواع شبکه‌های عصبی را مشخص کرد.

۳-۶- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس ساختمان کلی

بر اساس ساختمان کلی، شبکه‌ها می‌توانند تک لایه و چند لایه (شکل ۳-۴) باشند. هر لایه شامل ماتریس وزن، جمع‌کننده‌ها، بردار بایاس و تابع محرک می‌باشد. بردار ورودی (p) را می‌توان به عنوان لایه‌ی ورودی^۱ نام برد. این لایه را می‌توان شامل ماتریس وزن (W) معادل با ماتریس واحد، بردار بایاس صفر و تابع محرک خطی ($f(n) = n$) در نظر گرفت. در این وضعیت تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر با تعداد عناصر بردار ورودی می‌باشد [منهاج، ۱۳۷۹]. لایه‌ای که خروجی آن خروجی نهایی شبکه است را لایه‌ی خروجی^۲ می‌نامند. تمامی لایه‌هایی که بین لایه‌ی ورودی و لایه‌ی خروجی قرار می‌گیرند، لایه‌ی پنهان^۳ نامیده می‌شوند. لازم به ذکر است که لایه‌های مختلف می‌توانند توابع محرک متفاوت داشته باشند [طهماسبی، ۱۳۸۳].



شکل ۳-۴- شبکه چند لایه‌ای [راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲]

۳-۷- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس الگوریتم کنترل

واکنش شبکه به یک سیگنال ورودی، توسط الگوریتم کنترل تعیین می‌شود که بر این اساس دو نوع اصلی شبکه‌ها موجود می‌باشند؛ شبکه‌های پیشخور و شبکه‌های پسخور یا با ارتباط‌های برگشتی [Grima, 2000].

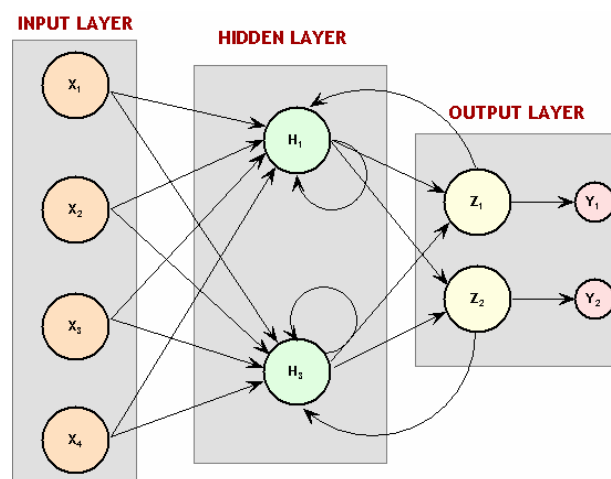
-
- 1- Input layer
 - 2- Output layer
 - 3- Hidden layer

۳-۷-۱- شبکه‌های پیشخور

در این شبکه‌ها نرون‌ها، ورودی خود را تنها از لایه قبلی دریافت می‌کنند و خروجی خود را تنها به لایه بعدی منتقل می‌کنند. شکل ۳-۴ یک شبکه پیشخور را نشان می‌دهد [طهماسبی، ۱۳۸۳].

۳-۷-۲- شبکه‌های پسخور یا برگشتی

مطابق شکل ۳-۵ در شبکه‌های پسخور حداقل، خروجی یک نرون، به عنوان ورودی همان نرون یا نرون‌های همان لایه و یا لایه‌ی قبل استفاده می‌شود [طهماسبی، ۱۳۸۳].



شکل ۳-۵- شبکه پسخور یا برگشتی [Jones, 2004]

۳-۸- دسته‌بندی شبکه‌ها بر اساس روش یادگیری

بر اساس روش یادگیری، شبکه‌های عصبی را می‌توان به سه دسته‌ی کلی تقسیم کرد: یادگیری با ناظر^۱، بدون ناظر^۲ و تقویتی^۳.

-
- 1- Supervised learning
 - 2- Unsupervised learning
 - 3- Reinforcement learning

۳-۸-۱- یادگیری با ناظر

یادگیری با ناظر زمانی به کار می‌آید که علاوه بر داده‌های ورودی، داده‌های خروجی مطلوب متناظر با آنها نیز در اختیار باشد، چنان که با عرضه‌ی ورودی‌ها به شبکه، خروجی‌های شبکه با خروجی‌های مطلوب مقایسه می‌شوند. با استفاده از یک قانون یادگیری همچون قانون تعمیم‌یافته‌ی دلتا^۱ (الگوریتم پس‌انتشار^۲) می‌توان وزن‌ها را بر اساس کمینه شدن یک معیار مشخص (مثلاً تابع هزینه) تنظیم نمود [Grima, 2000].

۳-۸-۲- یادگیری بدون ناظر

هنگامی که برای ساختن شبکه تنها داده‌های ورودی مهیا باشند، از این نوع یادگیری استفاده می‌شود و لذا وزن‌ها و بایاس‌ها تنها در پاسخ به ورودی‌ها اصلاح می‌شوند. در اینجا هیچ‌گونه خروجی مطلوب وجود ندارد. بیشتر این الگوریتم‌ها، به نوعی عمل خوشه‌بندی^۳ را انجام می‌دهند و الگوهای ورودی را به تعداد محدودی کلاس دسته‌بندی می‌کنند [راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲].

۳-۸-۳- یادگیری تقویتی

شبیه به یادگیری با ناظر است، با این تفاوت که در جایی که خروجی مطلوب برای ورودی شبکه فراهم باشد، الگوریتم یک امتیاز در نظر می‌گیرد. امتیاز، درجه‌ی عملکرد شبکه روی بخشی از ورودی‌ها است. در واقع اساس این روش، به حداقل رساندن رفتارهای نامطلوب است و این نوع یادگیری بین دو روش یادگیری با ناظر و بدون ناظر قرار می‌گیرد [راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲؛ Grima, 2000].

طبق الگوریتم‌های یادگیری انواع گوناگونی از شبکه‌های عصبی مصنوعی وجود دارند. از جمله، شبکه عصبی احتمالی^۴ (PNN)، شبکه عصبی رگرسیون عمومی^۵ (GRNN)، شبکه عصبی پس انتشار

1- Generalized delta rule

2- Backpropagation algorithm

3- Clustering

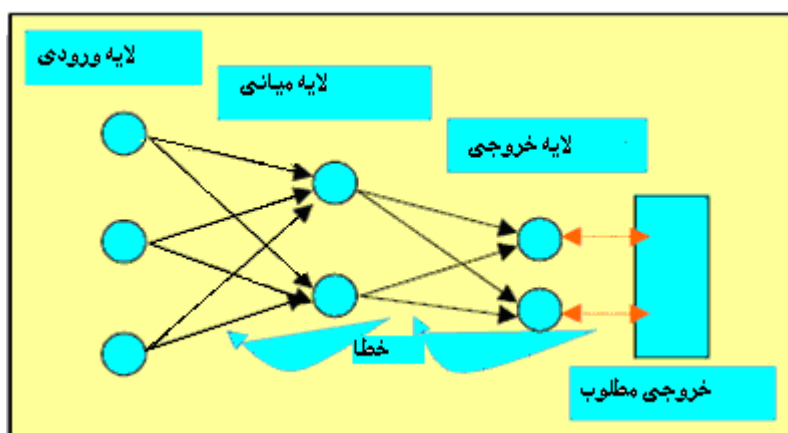
4- Probabilistic Neural Network (PNN)

5- General Regression Neural Network (GRNN)

(BPNN) و شبکه‌های عصبی شعاعی^۱ (RNN) که به علت استفاده از شبکه پس انتشار در این پایان‌نامه به توضیح این شبکه پرداخته شده است.

۳-۹- شبکه پس انتشار (BPNN)

یک نوع شبکه عصبی با ناظر است که از قانون تصحیح خطا به عنوان یک قانون یادگیری قدرتمند استفاده می‌کند. در اصل الگوریتم پس انتشار دارای دو مسیر اصلی است. یکی مسیر رفت که در آن تأثیر بردار ورودی بر روی لایه‌ی خروجی از طریق لایه‌های میانی منتقل می‌گردد (شکل ۳-۶). در حین این کار پارامترهای شبکه، ثابت در نظر گرفته می‌شوند و بردار خروجی که در لایه خروجی ایجاد می‌شود، پاسخ واقعی شبکه است. در مسیر دوم یا مسیر برگشت، پارامترهای شبکه، به منظور اصلاح خطا تغییر می‌کند و سیگنال خطا در لایه خروجی تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر، رویه فراگیری شبکه پس انتشار شامل فرستادن مقادیر ورودی به داخل شبکه و سپس محاسبه اختلاف بین خروجی محاسبه شده و خروجی مطلوب داده‌های آموزشی می‌باشد و اطلاعات مربوط به خطاها، دوباره برای اصلاح وزن به عقب باز می‌گردد تا بهترین و مناسب‌ترین مقدار وزن برای آنها حاصل شود [Rolon, 2004].



شکل ۳-۶- آموزش شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار [Al-Qahtane, 2000]

1- Radial Neural Networks (RNN)

اکنون مراحل انجام الگوریتم پس انتشار را به صورت ریاضی بیان می‌کنیم. خطای خروجی سلول j (در لایه خروجی) در تکرار n ام (یعنی ارائه مثال آموزشی n ام) عبارت است از:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (۸-۳)$$

که $d_j(n)$ پاسخ مطلوب و $y_j(n)$ خروجی سلول j است. اگر انرژی خطا برای سلول j ام را به صورت $\frac{1}{2}e_j^2(n)$ تعریف کنیم، انرژی خطای کل (برای تمام سلول‌های خروجی) عبارت است از [Haykin, 1990]:

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^c e_j^2(n) \quad (۹-۳)$$

که در آن c تعداد سلول‌های لایه خروجی است. فرض کنید تعداد مثال‌ها در مجموعه آموزشی، برابر N باشد. میانگین مربعات انرژی خطا با جمع کردن $E(n)$ ‌ها در مثال n ام و نرمال کردن آن به تعداد مثال‌ها (N) به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$E_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n) \quad (۱۰-۳)$$

E_{av} تابعی از تمام پارامترهای آزاد شبکه (مانند اوزان اتصال و بایاس‌ها) می‌باشد. برای یک مجموعه آموزشی، E_{av} معرف تابع هزینه (تابع خطا) است. هدف فرآیند یادگیری حداقل نمودن E_{av} است. روش ساده آموزش، به روز کردن اوزان به صورت مثال به مثال در طی یک دوره^۱ آموزش است. هر دوره شامل یک بار ارائه کامل همه مجموعه مثال‌های آموزشی به شبکه است.

الگوریتم پس انتشار، مقدار تصحیح وزن معادل $\Delta w_{ji}(n)$ را به وزن قبلی $w_{ji}(n)$ اضافه می‌کند. این مقدار تصحیح وزن متناسب با مشتق جزئی $E(n)$ نسبت به $w_{ji}(n)$ ، یعنی $\partial E(n) / \partial w_{ji}(n)$ است. مشتق جزئی مذکور، جهت جستجو را در «فضای اوزان» برای یافتن $w_{ji}(n)$ مناسب تعیین می‌کند. فرمول تعیین مقدار تصحیح وزن را می‌توان به صورت زیر نوشت [Haykin, 1990]:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (۱۱-۳)$$

1 - Epoch
2 - Weight space

η را نرخ یادگیری گویند. می‌توان ثابت کرد که:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_j(n) \quad (۱۲-۳)$$

که در آن $\delta_j(n)$ گرادیان محلی نامیده می‌شود و برای سلول خروجی j ام برابر است با:

$$\delta_j(n) = e_j(n) \phi'_j(v_j(n)) \quad (۱۳-۳)$$

در رابطه فوق ϕ' مشتق تابع محرک و v_j مجموعه وزن دار می‌باشند. رابطه گرادیان محلی برای سلول‌های خروجی و سلول‌های میانی (لایه‌های پنهان) متفاوت است. رابطه ۳-۱۳ برای سلول‌های خروجی صادق است.

برای سلول j ام میانی خواهیم داشت:

$$\delta_j(n) = \phi'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (۱۴-۳)$$

به طور خلاصه مقدار تصحیح وزن $\delta w_{ji}(n)$ که بر روی وزن اتصال سلول i به j اعمال می‌شود را می‌توان مطابق رابطه ۳-۱۲ به صورت زیر تعریف کرد:

$$(\text{خروجی سلول } j) \cdot (\text{گرادیان محلی}) \cdot (\text{نرخ یادگیری}) = (\text{مقدار تصحیح وزن})$$

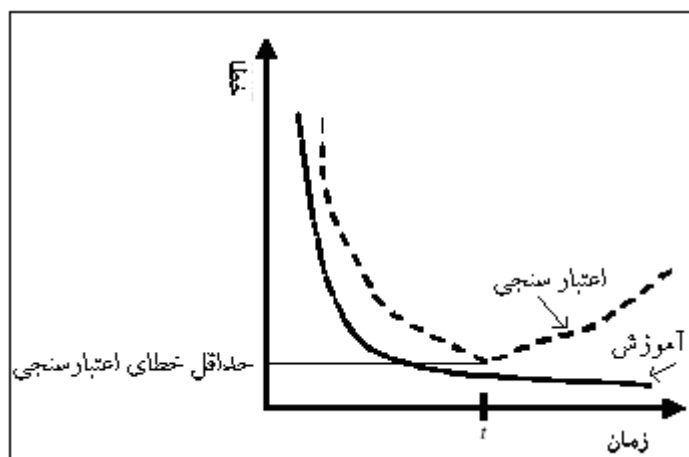
گرادیان محلی بسته به اینکه سلول j در لایه خروجی باشد یا لایه‌های میانی به ترتیب از روابط ۳-۱۳ و ۳-۱۴ محاسبه می‌شود. محاسبه هر دو این روابط مستلزم مشتق‌گیری از تابع محرک است. برای مشتق پذیر بودن تابع محرک ϕ لازم است این تابع پیوسته باشد [Haykin, 1990].

۳-۱۰- آموزش شبکه

آموزش، فرآیندی است که با توجه به الگوهای ورودی و خروجی معلوم، منجر به دستیابی به وزن‌های بهینه برای ورودی هر سلول شبکه عصبی می‌گردد که می‌توان توسط الگوریتم‌های مختلف آموزش را انجام داد. شبکه معمولاً بعد از چندین تکرار الگوها را یاد می‌گیرد، این تکرار به بزرگی شبکه بستگی دارد. یک شبکه بزرگ احتیاج به وقت بیشتری نسبت به یک شبکه کوچک، برای آموزش دارد. اساساً شبکه بعد از رسیدن به یک تکرار ماکزیمم، متوقف می‌گردد. به همین خاطر از خطای مجاز مینیمم استفاده می‌شود که اختلاف بین مقدار خروجی شبکه و خروجی مطلوب است که

باید کمتر از یک مقدار بخصوصی باشد. یعنی تا رسیدن به این مقدار خطا، وزن‌ها با توجه به قانون پس انتشار خطا اصلاح می‌گردند. همچنین می‌توان آموزش را بعد از اینکه شبکه از معیار توقف معین که در ادامه توضیح داده می‌شود، برخوردار شد، متوقف کرد. در طی آموزش، شبکه ممکن است بیش از اندازه تعلیم ببیند این بدان معنی است که در هنگام آموزش شبکه، خطا در مجموعه آموزش بعد از هر تکراری کم می‌شود و در تکرارهای زیاد این مقدار خطا به کمترین مقدار ممکن می‌رسد، در صورتی که شبکه برای داده‌های جدید، خطای زیادی را تولید می‌کند که ناشی از حفظ کردن الگوهای آموزشی توسط شبکه و قابلیت تعمیم کم آن است. این مشکل به عنوان بیش‌برازش^۱ ذکر می‌گردد. بیش‌برازش یک مشکل بحرانی در بیشتر ساختارهای شبکه‌های عصبی متعارف می‌باشد [Rolon 2004]. برای حل این مشکل دو روش توقف سریع^۲ آموزش شبکه و منظم‌سازی^۳ وجود دارد. در روش اول داده‌های موجود به سه زیر مجموعه آموزشی، اعتبار سنجی و تست طبقه‌بندی می‌شوند. مجموعه آموزشی برای محاسبه گرادیان، وزن‌ها و بایاس می‌باشد. خطای مجموعه اعتبارسنجی همراه آموزش شبکه رسم می‌گردد. معمولاً خطای مجموعه اعتبارسنجی در ابتدا آموزش همراه خطای آموزش کاهش می‌یابد ولی از یک زمانی به بعد مانند شکل (۳-۷) خطای مجموعه اعتبارسنجی شروع به افزایش می‌کند، این همان حالت بیش‌برازش است که در این زمان باید آموزش متوقف گردد و وزن‌ها و بایاس‌ها در مینیمم خطای اعتبار سنجی برگردانده شوند. خطای تست در طی آموزش استفاده نمی‌شود ولی برای مقایسه مدل‌های مختلف می‌تواند استفاده گردد. در این روش باید سعی نمود تا الگوریتم‌هایی (الگوریتم پس انتشار جهنده^۴ یا الگوریتم‌های سریع دیگر) که خیلی سریع همگرا می‌شوند، استفاده نشوند. یکی دیگر از معایب این روش استفاده از مجموعه اعتبارسنجی است که باعث کاهش در تعداد داده‌های آموزشی و متعاقب آن باعث کاهش کارایی روش در زمانی که تعداد داده‌ها کم است، می‌گردد [Demuth and Beale, 2002].

1- Over fitting
 2- Early stopping
 3- Regularization
 4- Resilient backpropagation



شکل ۷-۳- منحنی آموزش و اعتبارسنجی [Rolon, 2004]

روش منظم‌سازی، براساس اصلاح تابع کارآیی که معمولاً همان میانگین مربعات خطا^۱ (MSE)

در مجموعه آموزشی است (رابطه ۱۵-۳) کار می‌کند [Demuth and Beale, 2002].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2 \quad (15-3)$$

که در آن:

t_i : خروجی مطلوب، a_i : خروجی شبکه و N : تعداد الگوهای آموزشی است.

با اضافه کردن عبارت میانگین مربعات وزن‌ها^۲ (MSW) می‌توان این تابع را به صورت رابطه ۱۶-۳ اصلاح نمود:

$$MSEREG = \gamma MSE + (1 - \gamma) MSW \quad (16-3)$$

که γ نسبت کارآیی و $MSW = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i$ است.

استفاده از این تابع کارآیی باعث می‌شود که شبکه وزن‌ها و بایاس‌های کمتری داشته باشد و این شبکه را وادار می‌کند که پاسخ هموارتری ایجاد کند و کمتر به سوی بیش‌برازش پیش رود. مشکل اصلی در این روش تعیین مقدار بهینه نسبت کارآیی (γ) است [Demuth and Beale, 2002]. اگر مقدار این پارامتر زیاد در نظر گرفته شود ممکن است شبکه به سمت بیش‌برازش پیش رود و اگر این نسبت بیش از اندازه کوچک باشد، شبکه برآزش مناسبی برای داده‌های آموزشی نخواهد داشت. پس

1- Mean Squares Error (MSE)

2- Mean Squares Weights (MSW)

مطلوب است که مقدار بهینه را با روشی که به طور اتوماتیک کار می‌کند، تعیین کنیم. یک روش برای این کار، روش منظم‌سازی بیزین^۱ است که با الگوریتم "trainbr" صورت می‌گیرد. این الگوریتم هنگامی بهتر کار می‌کند که ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه در بازه [۱-] مقیاس‌بندی شوند. در هنگام استفاده از این الگوریتم، مهم است که اجازه دهیم شبکه تا زمان همگرایی پارامترها اجرا گردد [Demuth and Beale, 2002].

آموزش ممکن است با پیغام "Maximum MU reached" متوقف گردد. این مشخصه خوبی برای همگرایی الگوریتم است. همچنین می‌توانید بگویید که الگوریتم همگرا شده زمانی که میانگین مربعات خطا و میانگین مربعات وزن‌ها مقدار ثابت گردند و هیچ تغییری نکنند. از معایب این روش زمان همگرایی طولانی‌تر آن نسبت به روش توقف سریع می‌باشد. همچنین این روش آنچنان که برای تقریب توابع کاربرد دارد، در تشخیص الگو کارایی خوبی ندارد [Demuth and Beale, 2002].

۳-۱۱- پارامترهای شبکه

پارامترهای زیر اثر مستقیم در نحوه عملکرد شبکه دارد. کاربر می‌تواند این پارامترها را کنترل کند.

- ۱- تعداد لایه‌ها
- ۲- تعداد نرون‌های لایه پنهان
- ۳- تابع محرک
- ۴- مقداردهی اولیه به وزن‌ها و بایاس
- ۵- نرخ یادگیری و گشتاور

۳-۱۱-۱- تعداد لایه‌ها

محققین نشان دادند که یک شبکه با یک لایه پنهان که از تابع محرک سیگموئیدی استفاده می‌کند قادر به تقریب هر تابع پیوسته با تعداد معینی نرون در لایه پنهان می‌باشد. البته بیشتر تحقیقات نشان می‌دهد که یک لایه پنهان کافی است اما در بسیاری مواقع ممکن است اضافه کردن لایه پنهان دیگر باعث افزایش دقت و کاهش زمان یادگیری شود [Bishop, 1995].

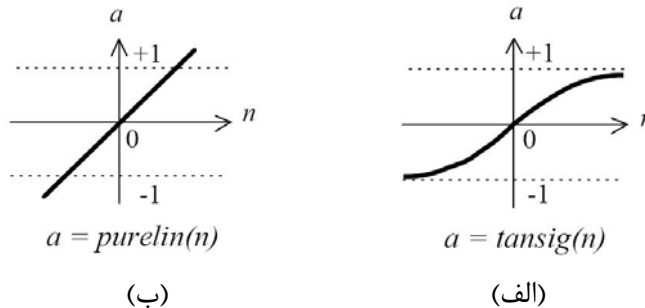
۳-۱۱-۲- تعداد نرون‌های پنهان

تعداد نرون‌های لایه پنهان نقش بسیار مهمی در میزان دقت شبکه بازی می‌کند، بنابراین یافتن تعداد مناسب آنها اهمیت بسیاری دارد. محققین تلاش‌های بسیاری در زمینه‌ی یافتن روشی برای انتخاب تعداد بهینه‌ی نرون‌های لایه پنهان نمودند. برخی از آنها واسطه‌ی هندسی تعداد نرون‌های ورودی و خروجی را به عنوان یک تعیین کننده خوب از تعداد نرون‌های لایه پنهان در شبکه‌هایی که تعداد نرون‌های خروجی در آنها کمتر از ورودی می‌باشد، پیشنهاد کردند [Poulton, 2001]. برخی از محققین بیان کردند که برای شبکه‌ای با یک لایه پنهان، تعداد $n+1$ نرون در این لایه نیاز است که (n) تعداد نرون‌های ورودی می‌باشد [Hecht-Nielson, 1987]. اما هیچ یک از این پیشنهادات در مورد مسائل مختلف عمومیت ندارد و تعداد بهینه نرون‌های لایه پنهان تنها از طریق آزمون و خطا قابل حصول می‌باشد [Poulton et al, 1992].

۳-۱۱-۳- انتخاب نوع تابع محرک

در شبکه پس از انتشار خطا، هر تابع مشتق پذیر و پیوسته‌ای که به طور یکنواخت افزایش یابد، می‌تواند به عنوان تابع محرک استفاده شود. معمول‌ترین این توابع، سیگموئیدی، تانژانت هیپربولیک (شکل ۳-۸-الف) و خطی (شکل ۳-۸-ب) می‌باشند. انتخاب نوع تابع محرک به هدف مسأله بستگی دارد. چنانچه شبکه یک مسأله دسته‌بندی را حل می‌کند، بهتر است از تابع سیگموئیدی یا تانژانت هیپربولیک در لایه خروجی استفاده شود. اگر هدف از حل مسأله، تقریب تابع باشد بهتر است از تابع

محرك غير خطی مانند سيگموئیدی برای نرون‌های لایه پنهان و از تابع خطی برای لایه خروجی استفاده شود [راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲؛ Poulton, 2001].



شکل ۳-۸- الف: تابع تانزانت هیپربولیک ب: تابع خطی [راهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲]

۳-۱۱-۴- مقداردهی اولیه وزن‌ها و بایاس

انتخاب مقدار اولیه مناسب برای وزن‌ها و بایاس‌ها بسیار مهم است. چنانچه این وزن‌ها خیلی بزرگ انتخاب شوند، توابع محرك سيگموئیدی سریعاً اشباع خواهند شد و احتمال گرفتار شدن شبکه در یک کمینه محلی^۱ به جای دستیابی به کمینه سراسری را افزایش می‌دهد. با یک انتخاب صحیح برای مقادیر اولیه وزن‌ها، می‌توان سرعت و دقت را در شبکه افزایش داد. بهتر است این انتخاب به گونه‌ای باشد تا ورودی خالص به z آمین نرون لایه پنهان کمتر از (البته نه خیلی کمتر از) یک شود. این امر در صورتی محقق می‌شود که وزن‌ها از رتبه $\frac{1}{k_j}$ باشند که k_j تعداد نرون‌های ورودی است که z آمین نرون لایه پنهان را تغذیه می‌کند. مقدار مناسب اولیه برای بایاس و وزن‌ها با آزمون و خطا حاصل می‌شود. مقدار بایاس اولیه برای لایه‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد. حضور بایاس باعث افزایش سرعت همگرایی در شبکه می‌شود [Poulton, 2001]

۳-۱۱-۵- نرخ یادگیری و گشتاور

این دو کمیت میزان تغییر وزن‌ها را کنترل می‌کند. انتخاب نرخ یادگیری بسیار مهم است و اندازه گام‌ها را در راستای حصول به حداقل خطا تنظیم می‌کند. زمانی که تابع خطا نسبتاً تخت باشد

1- Local minimum

استفاده از نرخ آموزشی بزرگتر، سودمند است. استفاده از نرخ آموزشی کوچک باعث طولانی‌تر شدن زمان همگرایی می‌شود. در روش‌های آموزشی سریع‌تر که با اعمال تغییراتی در الگوریتم پس انتشار خطا حاصل شده است، نرخ یادگیری ثابت نیست و در خلال آموزش تغییر می‌کند [آراهنمای نرم‌افزار MATLAB، ۲۰۰۲؛ Poulton, 2001].

گاهی اوقات شبکه به یک وضعیت پایدار دست می‌یابد ولی خروجی درستی ارائه نمی‌دهد. در واقع، شبکه در یک کمینه‌ی محلی به تله افتاده است. جهت رهایی از این کمینه محلی و سوق به سمت کمینه‌ی سراسری اضافه کردن کسری از تغییر وزن مرحله قبلی به عنوان گشتاور به معادله تنظیم ضرایب وزنی، سرعت همگرایی را نیز افزایش می‌دهد و احتمال گیر افتادن شبکه را در کمینه‌های محلی کاهش می‌دهد. گشتاور یک عدد ثابت مثبت $0 < \beta < 1$ می‌باشد اما این کمیت در برخی از الگوریتم‌های آموزشی سریع‌تر، نسبت به زمان متغیر تعریف می‌شود.

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \alpha \delta_{pj} x_{pi} + \beta (w_{ji}(t) - w_{ji}(t-1)) \quad (3-17)$$

α : نرخ یادگیری و β : گشتاور

یک نرخ یادگیری کوچک می‌تواند با یک گشتاور بزرگتر جهت تسریع همگرایی استفاده شود و یک نرخ یادگیری بزرگتر معمولاً با یک گشتاور کوچکتر جهت اطمینان از پایداری شبکه می‌تواند همراه شود. مقادیر گشتاور و نرخ یادگیری اغلب توسط آزمون و خطا، انتخاب می‌شوند [Poulton, 2001].

۳-۱۲- مزایا و معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی دارای مزایای زیر می‌باشند:

- ۱- شبکه‌های عصبی توان بالقوه‌ای برای حل مسائلی دارند که شبیه‌سازی آنها از طریق منطقی، تکنیک‌های تحلیلی و تکنولوژی‌های استاندارد نرم‌افزاری مشکل است.
- ۲- به دلیل پیشرفت‌های تکنیکی، از سرعت پردازش بالایی برخوردار شده است.

۳- گره‌های عصبی در مواقعی که شرایط تغییر می‌کند بسیار انعطاف‌پذیر هستند. همچنین نگهداری آنها بسیار ساده است.

۴- هر شبکه چند لایه، یک رابطه غیر خطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را توسط اتصالات نرون‌های غیر خطی ایجاد می‌کند و احتیاج به هیچ نوع مفروضات در مورد اساس توزیع داده‌ها برای طراحی شبکه ندارد، بنابراین محاسبات آماری لازم نمی‌باشد.

۵- ساختار موازی شبکه، آن را در محاسبات موازی توانا می‌کند. خسارت دیدن یک سری نرون‌ها و اتصالات، باعث خسارت در کارایی همه شبکه نمی‌شود.

۶- توانایی یادگیری و تعمیم، قابلیت‌های دیگر شبکه هستند [Bhatt, 2002].

علیرغم تمام مزایای جالب توجه شبکه عصبی، اشکالاتی نیز به این شبکه‌ها وارد است، که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- به طور کلی، شبکه‌های عصبی مصنوعی در درون‌یابی عملکرد خوبی دارند ولی در برون‌یابی چندان قوی نیستند. آن‌ها می‌توانند الگوهایی را که قبلاً دیده‌اند تشخیص دهند و الگوهای میانی را نیز که ندیده‌اند، در حیطه توانایی خود قرار دهند. ولی الگوهایی را که خارج از گستره‌ی الگوهای آموزش داده‌ی اولیه شبکه هستند را نمی‌توانند به خوبی طبقه‌بندی کنند، زیرا نمونه‌های چندانی را برای مقایسه در اختیار ندارند.

۲- هر چه حجم داده‌های آموزشی افزایش یابد، زمان آموزش شبکه نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این انتخاب داده‌های آموزشی مناسب، تأثیر مستقیم بر راندمان آموزشی شبکه دارد.

۳- تاکنون روش مشخصی برای تعیین ساختار بهینه شبکه، معرفی نشده است. به همین دلیل باید از روش‌های سعی و خطا برای یافتن ساختار بهینه استفاده کرد.

۴- سیستم‌های شبکه‌های عصبی قادر به توضیح منطق و قاعده کار نیستند و اثبات درستی نتایج بسیار دشوار است چرا که در بسیاری از مسائل، وزن‌های تعدیل شده قابل تفسیر نیستند. بنابراین منطقی که پشت تصمیم نهفته است را نمی‌توان روشن نموده و اثبات کرد.

۵- محاسبات شبکه‌های عصبی معمولاً محتاج به مقادیر زیادی داده برای آموزش و تست مدل است.

۳-۱۳- عوامل کلیدی در کاربرد موفقیت آمیز شبکه‌های عصبی

مراحل ساخت یک مدل شبکه‌ی عصبی به منظور تخمین، طبقه‌بندی یا پیش‌بینی عبارتند از:

۱- شناخت متغیرهای ورودی و خروجی. ۲- نرمال کردن داده‌های ورودی و خروجی. ۳- انتخاب ساختار مناسب برای شبکه‌ی عصبی. ۴- آموزش با داده‌های آموزشی معرف. ۵- آزمودن شبکه با داده‌هایی مستقل از مجموعه‌ی آموزشی و در صورت لزوم ادامه آموزش و تنظیم مثال‌های آموزشی، ساختار شبکه و پارامترهای آن.

اگر چه نیازی به دانستن دقیق کارکرد درونی شبکه‌های عصبی نیست، با این حال برای استفاده موفقیت آمیز از شبکه‌های عصبی رعایت موارد زیر ضروری است: انتخاب صحیح مجموعه آموزشی، ارائه داده‌ها به صورتی که توانایی تشخیص شبکه را ماکزیمم کند، تفسیر نتایج شبکه و درک جزئیات درون شبکه مانند ساختار آن و پارامترهای کنترل یادگیری، انتخاب صحیح اندازه لایه پنهان بسیار مهم است. هر چه تعداد نرون‌های لایه پنهان بیشتر شود قابلیت شبکه برای تشخیص الگو بیشتر می‌شود. این توانایی یک اشکال دارد و آن این که شبکه عصبی می‌تواند هر یک از مثال‌های آموزشی را به حافظه بسپارد. این مشکل را بیش‌برازشی می‌نامند. در حالی که هدف از به کارگیری شبکه‌های عصبی تعمیم دادن بر اساس مجموعه آموزشی است نه حفظ آن. برای جلوگیری از این مشکل نباید لایه‌ی پنهان، نرون‌های زیادی داشته باشد [Berry and Linoff, 1997]. معمولاً در لایه‌ی پنهان کمترین مقدار ممکن نرون‌ها که بتوانند خطای شبکه را تا حد زیادی کاهش دهند قرار داده می‌شود [Singer and Kouda, 1996]. حال که ساختار و چگونگی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی تا حدودی روشن گردید، می‌توان به کمک این شبکه‌ها به مدل‌سازی فرآیند حفاری دورانی پرداخت.



فصل چهارم

مدل رگرسیون خطی چندمتغیره

بورگوین-یانگ



مدل رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین - یانگ

۴-۱- مقدمه

چگونگی تأثیر متغیرهای مهم حفاری که مورد بحث قرار گرفتند بر نرخ نفوذ، بسیار پیچیده بوده و تنها بخشی از آن شناخته شده است. بنابراین، ارائه‌ی یک مدل ریاضی دقیق برای فرآیند حفاری دورانی هنوز ممکن نیست. با این حال مدل‌های ریاضی متعددی در جهت ترکیب روابط شناخته شده پیشنهاد گردیده‌اند. این مدل‌ها امکان استفاده از روش‌های بهینه‌سازی متداول را برای مسئله‌ی انتخاب بهترین بار و سرعت دوران مته و رسیدن به حداقل هزینه به ازای هر فوت میسر می‌سازند. نویسندگان زیادی از کاهش قابل توجه هزینه‌ی حفاری در نتیجه‌ی استفاده از مدل‌های تقریبی ریاضی گزارش داده‌اند [Bourgoyne et al, 1991].

۴-۲- تحلیل هزینه‌ی حفاری

وظیفه‌ی اصلی مهندس حفاری پیشنهاد روش‌های حفاری‌ایی است که به تکمیل موفق چاه بصورتی ایمن و تا حد امکان ارزان منجر شود. پیشنهادات او می‌بایست در ارتباط با عملیات روزمره‌ی دکل همچون عمل‌آوری سیال حفاری، عملکرد پمپ، انتخاب مته، و هر مشکل دیگری باشد که در حین عملیات حفاری رخ می‌دهد. در بسیاری از موارد، استفاده از یک معادله‌ی هزینه‌ی حفاری می‌تواند در ارائه‌ی این پیشنهادات مفید باشد. هدف اولیه از کنترل هزینه حین عملیات حفاری به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های چاه است. متأسفانه، کنترل هزینه اغلب بدون ملاحظه‌ی عملیات حفاری به معادله در می‌آید. روش معمول، تقسیم هزینه‌های حفاری به (۱) هزینه‌های متغیر حفاری و (۲) هزینه‌های عملیاتی ثابت است که هزینه‌های ثابت مستقل از تصمیم‌گیری‌های احتمالی در جریان عملیات حفاری می‌باشد [Bourgoyne et al, 1991; Moore, 1986].

۴-۳- معادله‌ی هزینه‌ی حفاری

عمده‌ترین کاربرد فرمول هزینه‌ی حفاری، ارزیابی عملکرد مته است. بخش زیادی از زمان مورد نیاز برای کامل کردن یک چاه یا صرف حفاری می‌شود و یا انجام پیمایش برای تعویض مته. کل زمان مورد نیاز برای حفاری تا یک عمق مشخص، ΔD ، را می‌توان به صورت مجموع زمان کلی چرخش مته در طی کارکردش، t_b ، زمان نچرخیدن مته، t_c ، و زمان پیمایش، t_t ، بیان کرد. معادله‌ی هزینه‌ی حفاری به صورت زیر است:

$$C_f = \frac{C_b + C_r(t_b + t_c + t_t)}{\Delta D} \quad (۱-۴)$$

که C_f هزینه‌ی حفاری به ازای واحد عمق، C_b هزینه‌ی مته و C_r هزینه‌ی عملیاتی ثابت دکل در واحد زمان می‌باشد. از آنجایی که در تابع هزینه‌ی حفاری از عوامل ریسک صرف نظر می‌شود، در بیشتر مواقع می‌بایست نتایج تحلیل هزینه را با قضاوت مهندسی تعدیل کرد. کاهش هزینه‌ی کارکرد مته در صورتی که با افزایش خیلی زیاد ریسک مواجهه با مشکلات حفاری از قبیل چسبیدن لوله، انحراف چاه، بزرگ‌شدگی چاه و غیره همراه باشد، لزوماً منجر به کاهش هزینه‌های چاه نخواهد شد [Bourgoyne et al, 1991].

۴-۴- معادله‌ی نرخ نفوذ برای مته‌های الماسی

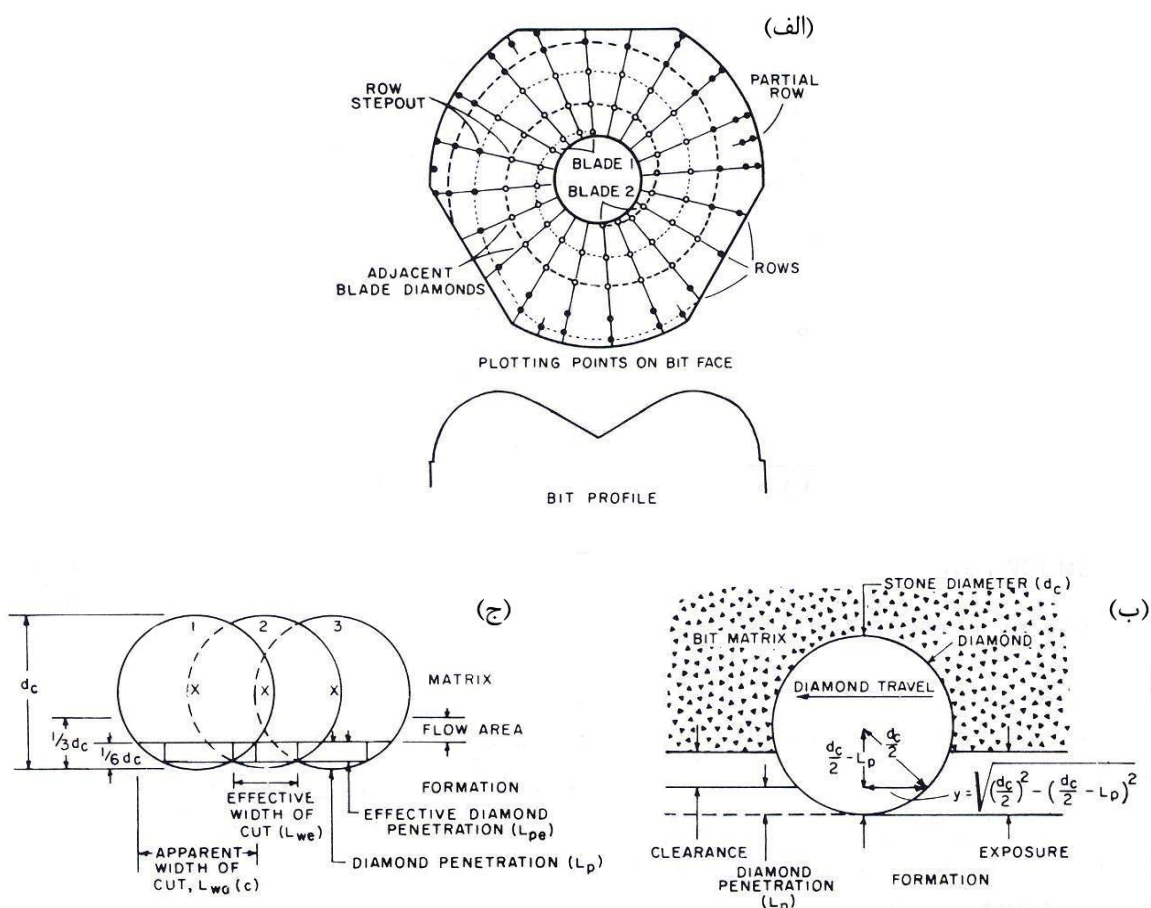
مته‌های الماسی نیز به خوبی دیگر انواع مته‌های تیغه ثابت (سایشی) طوری طراحی شده‌اند که به ازای هر دور چرخش، به حداکثر نفوذ معینی برسند. در شرایط ایده‌آل، بار مته و گشتاور به صورتی هستند که مانع از فرو رفتن کامل مته به درون سازند در نرخ حفر طراحی شده شوند. نرخ نفوذ یک مته‌ی تیغه ثابت با توجه به نفوذ معین عنصر بُرنده به درون سازند به صورت زیر است [Bourgoyne et al, 1991]:

$$R = L_{pe} n_{be} N \quad (۲-۴)$$

که در آن، L_{pe} : نفوذ مؤثر هر عنصر برنده، n_{be} : تعداد مؤثر تیغه‌ها، و N : سرعت دوران است.

پترسون^۱ معادلات نظری مربوط به مته های الماسی را با توجه به نفوذ مؤثر L_{pe} و تعداد تیغه ها n_{be} ارائه داده است. این معادلات را می توان برای مدلی که بر اساس موارد زیر ساده شده بیان نمود:

۱- مته از یک پیشانی تخت^۲ که عمود بر محور چاه است برخوردار باشد.



شکل ۴-۱- آرایش دندانه های متهی الماسی مفروض در معادله ی نرخ نفوذ [Bourgoyne et al, 1991]

۲- هر تیغه، از الماس هایی که به صورت حلزونی همانند شکل ۴-۱- الف قرار گرفته اند تشکیل شده باشد.

۳- دانه های الماس دارای شکل کروی همانند شکل ۴-۱- ب باشند.

۴- فاصله ی الماس ها به گونه ای باشد که سطح مقطع برداشته شده بوسیله ی هر دانه، با توجه به عمق نفوذ طراحی شده حداکثر باشد.

۵- مته در عمق نفوذ طراحی شده کار کند.

1- Peterson

2- Flat face

۶- هیدرولیک مته برای پاکسازی کامل ته چاه کافی باشد.

با این شرایط، نفوذ مؤثر L_{pe} و تعداد مؤثر تیغه ها n_{be} بصورت زیر می باشد:

$$L_{pe} = 0.67 L_p \quad (4-3 \text{ الف})$$

$$n_{be} = 1/92 \left(\frac{C_c}{s_d} \right) d_b \sqrt{d_c L_p - L_p^2} \quad (4-3 \text{ ب})$$

که در آن، C_c : تراکم دانه های الماس (قیراط بر اینچ مربع)، L_p : عمق واقعی نفوذ هر دانه (اینچ)، d_b : قطر مته (اینچ)، d_c : قطر متوسط دانه های الماس پیشانی مته (اینچ)، و s_d : اندازه ی الماس (قیراط بر دانه) است.

برای محاسبه ی بار مته ی مورد نیاز و رسیدن به نفوذ طراحی شده ی L_p ، از یک خصوصیت سازند به نام مقاومت سازند^۱، r_f ، استفاده می شود. مقاومت سازند، فشار مورد نیاز برای غلبه بر استحکام سازند^۲ و امکان نفوذ دانه ی الماس در سنگ است.

$$r_f = \frac{W_e}{A_{dt}} \quad (4-3 \text{ ج})$$

که W_e بار مؤثر وارد بر مته با احتساب نیروهای هیدرولیکی است، و A_{dt} کل سطح تماس الماس با سازند می باشد. برای محاسبه ی مقاومت سازند می توان از نرخ نفوذی که پس از عملکرد مته در سازند مورد نظر مشاهده می شود استفاده کرد [Bourgoyne et al, 1991].

سطح تماس دانه ی کروی نشان داده شده در شکل ۴-۱ ب به صورت زیر خواهد بود:

$$A_{dt} = \frac{\pi^2 d_b^2}{4} \left(\frac{C_c}{s_d} \right) (d_c L_p - L_p^2) \quad (4-3 \text{ د})$$

۴-۵- معادله ی نرخ نفوذ برای مته های مخروط چرخشی

تلاش برای انتخاب بارهای مته و سرعت های دورانی که دارای کمترین هزینه باشند، حفاری با حداقل هزینه نامیده می شود. افزایش نرخ حفاری بدلیل بارهای بیشتر یا سرعت های دوران بالاتر با کاهش عمر مته ترکیب شده و برای پیش بینی بهترین حدود عملیاتی مته ها استفاده می گردد. با

1- Formation resistance

2- Formation strength

توجه به شکل های ۲-۱۰ و ۲-۱۲ می توان معادله ی ۴-۴ را برای نرخ حفاری در مقابل بار مته و سرعت دوران نوشت [Moore, 1986].

$$R = KWN^a \quad (4-4)$$

که در آن، R : نرخ حفاری (فوت در ساعت)، K : ثابت تناسب، W : بار روی مته (پوند بر اینچ)، N : سرعت دوران مته (دور در دقیقه)، a : توانی بین ۰/۴ و ۱ است.

توان a برای سرعت دوران مته برابر است با ۰/۴ در سازندهای خیلی سخت تا ۱ در سازندهای نرم. مقدار واقعی a را می توان از آزمایش های صحرایی حفاری تعیین نمود [Moore, 1986].

معادله ی ۴-۴ نرخ حفاری را در هر لحظه از زمان می دهد یا می توان از آن به عنوان میانگین نرخ حفاری برای یک دوره ی کامل عملکرد مته استفاده کرد. در عمل، برای مته های دنداندار که دارای روندی کُند شونده هستند، معادله ی ۴-۴ به صورت زیر نوشته می شود:

$$R = \frac{KWN^a}{1 + K'D_n} \quad (5-4)$$

که در آن، K' : مقدار ثابت، D_n : فرسودگی نرمالایزشده ی دندان است. ثابت K' و D_n را می توان از آزمایش های صحرایی حفاری تعیین نمود.

رابطه ی بین عمر مته و عمر یاتاقان مته، L ، در معادله ۴-۶ آمده است:

$$L = \frac{K''}{NW^b} \quad (6-4)$$

که در آن، K'' : ثابت تناسب، b : توانی بین ۱ و ۲ است. توان b تابعی از نوع سیال حفاری بوده و بسته به میزان ساینده ی سیال در تماس با یاتاقان ها بین ۱ و ۲ در تغییر است. بهترین روش برای بدست آوردن b ، رسم عمر مته در مقابل بار مته بر روی کاغذ لگاریتمی است [Moore, 1986].

در اینجا توضیح همه ی روش های مورد استفاده در بهینه کردن بار مته یا سرعت دوران میسر نمی باشد. راهکار اساسی برای بهینه سازی همانطور که در معادله ۴-۱ آمده با هزینه به ازای هر فوت شروع می شود، آنگاه عبارت هایی برای نرخ حفاری به شکل تابعی از بار مته و سرعت دوران نوشته و در نهایت عمر مته به عنوان تابعی از بار مته و سرعت دوران بیان می شود. این مسئله در معادلات ۴-۱، ۴-۴ و ۴-۶ قابل مشاهده است. بار بهینه روی مته ی حفاری با استفاده از معادله ۴-۷ تعیین می گردد:

$$W_{opt} = \left[\frac{C_r K''}{(b-1)N(B+C_r T_r)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (۷-۴)$$

که در آن، B : هزینه ی مته (دلار)، C_r : هزینه های دکل (دلار در ساعت)، T_r : زمان پیمایش (ساعت) است. معادله ۷-۴ یک معادله ساده شده است. فرض می شود C_r ، عددی ثابت بوده و سرعت دوران هم تغییر نمی کند [Moore, 1986].

در صورتی که بار مته در سطحی ثابت حفظ شود، می توان معادله ۷-۴ را برای بهینه کردن سرعت دوران استفاده نمود. با این حال، اگر شاخص فرسودگی مته، a ، در معادله ۴-۴، ۱ باشد آنگاه حدود سرعت دوران با توجه به توان میز دوار، گشتاور رشته ی حفاری یا بعضی حدود آستانه ای یاتاقان های مته تعیین می گردد. اگر مقدار a در معادله ی ۴-۴ کمتر از ۱ باشد، می توان از معادله ی ۸-۴ برای محاسبه ی سرعت بهینه ی دوران مته، N_{opt} ، استفاده کرد.

$$N_{opt} = \frac{a C_r K''}{(1-a)(B+C_r T_r) W^b} \quad (۸-۴)$$

حل معادله ی ۸-۴ به رابطه ی نرخ حفاری و سرعت دوران بستگی دارد [Moore, 1986].

۴-۶- مدل حفاری بورگوین- یانگ

تا پیش از ارائه ی مدل بورگوین- یانگ در ۱۹۷۴، از یک مدل حفاری برای بهینه سازی بار مته و سرعت دوران، از یک مدل متفاوت برای بهینه سازی هیدرولیک مته و از مدل دیگری برای تعیین فشار غیر نرمال سازند از داده های حفاری استفاده می شد و هر مدل بر پایه ی داده های آزمایشگاهی و صحرایی ناکافی استوار بود. لذا آنها تلاش کردند آنچه را که تا آن زمان در مورد فرآیند حفاری دورانی شناخته شده بود در قالب یک مدل ارائه نمایند و معادلات مربوط به محاسبه ی فشار منفذی سازند و وزن بهینه ی مته، سرعت بهینه ی دوران و هیدرولیک مته را که با مدل مذکور سازگاری داشت، توسعه دهند و در نهایت روشی را برای کالیبره نمودن سیستماتیک مدل حفاری با استفاده از داده های صحرایی فراهم کنند [Bourgoyne and Young, 1974]. شاید کامل ترین مدل ریاضی حفاری که برای مته های مخروط چرخشی استفاده شده، مدل پیشنهادی بورگوین و یانگ باشد.

مدلی که در ۱۹۷۴ برای پیش بینی اثر پارامترهای مختلف حفاری، x_j ، بر نرخ نفوذ، dD/dt ، انتخاب شد عبارت است از:

$$\frac{dD}{dt} = \exp \left(a_1 + \sum_{j=2}^n a_j x_j \right) \quad (9-4)$$

که از $\exp(z)$ برای نشان دادن تابع نمایی e^z استفاده می شود. مدل سازی رفتار حفاری در یک نوع سازند معین با انتخاب ضرایب ثابت a_1 تا a_n در معادله ی ۹-۴ امکان پذیر است. از آنجایی که معادله ی ۹-۴ یک معادله ی خطی است، می توان این ضرایب ثابت را از آنالیز رگرسیون چند متغیره تعیین کرد [Bourgoyne and Young, 1974]. آنها از هشت رابطه ی تابعی برای مدل کردن اثر بیشتر متغیرهای حفاری مطرح شده در بخش های قبلی استفاده کردند. این روابط، x_j ها، در جدول ۱-۴ نشان داده شده اند.

بورگوین و یانگ در ۱۹۹۱ با توجه به پیشرفت های صورت گرفته در صنعت حفاری و انجام تحقیقات بیشتر بر روی عوامل مؤثر، تغییراتی در نحوه ی ارتباط این عوامل و نرخ حفاری ایجاد نمودند، اما ساختار کلی مدل را تقریباً به همان صورت حفظ کردند. در روش معمول برای تشکیل معادله ی نرخ نفوذ فرض بر این است که اثرات بار مته، سرعت دوران، فرسودگی دندانه و غیره بر نرخ نفوذ همگی مستقل از یکدیگر بوده و اثر ترکیبی آنها را می توان با معادله ی به شکل زیر محاسبه کرد.

$$R = (f_1)(f_2)(f_3)(f_4) \dots (f_n) \quad (4-۱۰ الف)$$

که f_1, f_2, f_3, f_4 و غیره رابطه ی تابعی بین نرخ نفوذ و متغیرهای مختلف حفاری را نشان می دهد. روابط تابعی انتخابی معمولاً بر اساس مشاهده ی روند تغییرات متغیرها در مطالعات آزمایشگاهی یا صحرایی هستند. بعضی از محققان در تعریف رابطه روش های ترسیمی را انتخاب می کنند، حال آن که برخی دیگر، از روش های برازش منحنی برای بدست آوردن عبارت های تجربی ریاضی استفاده می کنند. بعضی از معادلات ریاضی نسبتاً ساده تنها دارای دو یا سه متغیر حفاری هستند که به عنوان نمونه می توان به مدل بینگهام اشاره کرد [Bourgoyne et al, 1991].

مدل حفاری بورگوین- یانگ را می توان با معادله ی ۴-۱۰-الف و روابط زیر تعریف کرد

[Bourgoyne et al, 1991]:

$$f_1 = e^{\gamma/3.03 a_1} = K \quad (ب-۱۰-۴)$$

$$f_2 = e^{\gamma/3.03 a_2 (1.0 \dots - D)} \quad (ج-۱۰-۴)$$

$$f_3 = e^{\gamma/3.03 a_3 D^{1/69} (g_p - \rho_c)} \quad (د-۱۰-۴)$$

$$f_4 = e^{\gamma/3.03 a_4 D (g_p - \rho_c)} \quad (ه-۱۰-۴)$$

$$f_5 = \left[\frac{\left(\frac{W}{d_b} \right) - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t}{\psi - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t} \right]^{a_5} \quad (و-۱۰-۴)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{\psi} \right)^{a_6} \quad (ز-۱۰-۴)$$

$$f_7 = e^{-a_7 h} \quad (ح-۱۰-۴)$$

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1.0 \dots} \right)^{a_8} \quad (ط-۱۰-۴)$$

که در این معادلات، D : عمق قائم واقعی چاه (فوت)، g_p : گرادیان فشار منفذی (پوند بر گالن)، ρ_c : وزن مخصوص معادل گردش گل^۱ (پوند بر گالن)، $(W/d_b)_t$: بار آستانه ای مته بر هر اینچ قطر مته که در آن مته شروع به حفر می کند (۱۰۰۰ پوند بر اینچ)، h : کُندی کسری دندان، F_j : نیروی هیدرولیکی اعمالی در زیر مته (پوند) و a_1 تا a_8 : نمایه های متناظر با متغیرهای حفاری (ضرایب ثابتی هستند که می بایست بر اساس شرایط محل حفاری انتخاب شوند) است.

برای مشاهده ی تفاوت های دو مدل ارائه شده بهتر است معادله ی ۴-۱۰ و روابط f_1 تا f_8 را به شکل معادله ی ۴-۹ و روابط تابعی (پارامترهای حفاری) مربوط به آن که در جدول ۴-۱ نشان داده شده نوشت. این کار با گرفتن لگاریتم طبیعی (ln) از طرفین معادله ی ۴-۱۰ و f_j ها و انجام برخی عملیات ریاضی امکان پذیر است. به عنوان نمونه، پارامتر حفاری x_2 متناظر با f_2 به صورت زیر خواهد بود.

1- Equivalent circulating mud density (ECD)

$$\ln f_r = \ln \left(e^{2/303 a_r (10,000 - D)} \right) = 2/303 a_r (10,000 - D) \longrightarrow x_r = 2/303 (10,000 - D)$$

به این ترتیب مدل حفاری مورد نظر (معادله ی ۴-۱۱)، تقریباً همان مدل ارائه شده توسط بورگوین و یانگ در ۱۹۷۴ (معادله ی ۴-۹) است، با این تفاوت که تعاریف جدیدی برای برخی از x_j ها یا همان f_j ها ارائه گردیده و از ضریب ثابت $2/303 a_1$ به جای a_1 استفاده شده است. پارامترهای اصلاح شده ی حاصل نیز برای مقایسه در جدول ۴-۱ در کنار پارامترهای اولیه آورده شده اند.

$$R = \frac{dD}{dt} = \exp \left(2/303 a_1 + \sum_{j=2}^n a_j x_j \right) \quad (۴-۱۱)$$

توجه داشته باشید که معادله ی ۴-۱۱ و پارامترهای حفاری مربوط به آن که در ستون پارامترهای اصلاح شده ی جدول ۴-۱ آمده اند، مبنای تمامی محاسبات رگرسیون خطی می باشند.

جدول ۴-۱- پارامترهای حفاری مدل بورگوین-یانگ

پارامتر مؤثر	عبارت	مدل اولیه (۱۹۷۴)	مدل اصلاح شده (۱۹۹۱)
مقاومت سازند	—	ثابت a_1	ثابت $2/303 a_1$
تراکم سازند	$a_r x_r$	$x_r = 10,000 - D$	$x_r = 2/303 (10,000 - D)$
	و $a_r x_r$	$x_r = D^{0.69} (g_p - 9/0)$	$x_r = 2/303 D^{0.69} (g_p - 9/0)$
اختلاف فشار (overbalance)	$a_f x_f$	$x_f = D (g_p - \rho_c)$	$x_f = 2/303 D (g_p - \rho_c)$
قطر و بار مته (W/d_b)	$a_\delta x_\delta$	$x_\delta = \ln \left[\frac{\left(\frac{W}{d_b} \right) - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t}{\Psi - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t} \right]$	$x_\delta = \ln \left[\frac{\left(\frac{W}{d_b} \right) - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t}{\Psi - \left(\frac{W}{d_b} \right)_t} \right]$
سرعت دوران (N)	$a_\epsilon x_\epsilon$	$x_\epsilon = \ln \left(\frac{N}{100} \right)$	$x_\epsilon = \ln \left(\frac{N}{\epsilon_0} \right)$
فرسودگی مته (h)	$a_v x_v$	$x_v = -h$	$x_v = -h$
هیدرولیک مته	$a_\lambda x_\lambda$	$x_\lambda = \frac{\rho q}{350 \mu d_n}$	$x_\lambda = \ln \left(\frac{F_j}{10,000} \right)$

۴-۷- عوامل مؤثر به کار رفته در مدل حفاری بورگوین- یانگ

۴-۷-۱- استحکام سازند

تابع f_1 یا ضریب ثابت a_1 ، نخست تأثیر استحکام سازند و نوع مته را بر نرخ نفوذ نشان می‌دهد و بعد اثر متغیرهای حفاری مثل نوع گل، جامدات همراه گل و غیره را که در مدل حفاری دیده نشده‌اند شامل می‌شود. در هنگام استفاده از روش رگرسیون چند متغیره برای محاسبه‌ی مقادیر a_1 تا a_8 از داده‌های حفاری قبلی بدست آمده در منطقه که توسط بورگوین و یانگ ارائه شده است، بیان نمایی f_1 مفید خواهد بود. ضریب «۲/۳۰۳» اجازه می‌دهد تا ضریب ثابت a_1 براحتی بر حسب لگاریتم اعشاری نرخ نفوذ مشاهده شده تعریف شود [Bourgoyne et al, 1991; Bourgoyne and Young, 1974].

۴-۷-۲- تراکم سازند

توابع f_2 و f_3 یا عبارت‌های a_2x_2 و a_3x_3 تأثیر تراکم سازند بر نرخ نفوذ را مدل می‌کنند. تابع f_2 پاسخگوی افزایش عمقی استحکام سنگ ناشی از تراکم نرمال بوده و با کاهش نمایی نرخ نفوذ همراه است. تابع f_3 اثر کم‌ترامی تجربه شده در سازندهای تحت فشار طبیعی را مدل می‌کند و نشان از افزایش نمایی نرخ نفوذ با گرادیان فشار منفذی دارد. توجه داشته باشید که حاصل $(f_2 f_3)$ یا به عبارت دیگر $e^{a_2x_2+a_3x_3}$ برای گرادیان فشار منفذی معادل با ۹ پوند بر گالن و عمق ۱۰۰۰۰ فوت برابر با ۱/۰ است [Bourgoyne et al, 1991; Bourgoyne and Young, 1974].

۴-۷-۳- اختلاف فشار یا عدم تعادل

تابع f_4 یا عبارت a_4x_4 تأثیر عدم تعادل بر نرخ نفوذ را مدل می‌کند و نشان دهنده‌ی کاهش نمایی نرخ نفوذ با اختلاف فشار اضافی در ته چاه است. این تابع برای عدم تعادل صفر یعنی وقتی فشار منفذی سازند با فشار ته چاه برابر باشد، دارای مقدار ۱/۰ خواهد بود [Bourgoyne et al, 1991; Bourgoyne and Young, 1974].

۴-۷-۴- قطر و وزن مته، W/d_b ، و سرعت دوران، N

توابع f_ϵ و f_δ یا عبارت‌های $a_\epsilon x_\epsilon$ و $a_\delta x_\delta$ تأثیر بار مته و سرعت دوران بر نرخ نفوذ را مدل می‌کنند. با ملاحظه‌ی این توابع می‌توان گفت نرخ نفوذ دارای رابطه‌ی مستقیم با $(W/d_b)^{a_\delta}$ و N^{a_ϵ} است. توجه داشته باشید هنگامی که W/d_b دارای مقدار ۴۰۰۰ پوند بر اینچ قطر مته و سرعت دوران دارای مقدار ۶۰ دور در دقیقه باشد مقادیر f_δ و f_ϵ برابر با ۱/۰ خواهند بود (توجه داشته باشید که در مدل اولیه عبارت $e^{a_\epsilon x_\epsilon}$ برای ۱۰۰ دور در دقیقه دارای مقدار ۱ است). انتخاب این مقادیر برای بار مته و سرعت دوران از این جهت است که حاصل $f_\delta f_\epsilon$ برای شرایط متعارف حفاری نزدیک به ۱/۰ باشد. مقدار بار آستانه‌ای مته غالباً بسیار کوچک بوده و در مناطقی شبیه به سواحل خلیج آمریکا که دارای سازندهایی نسبتاً نرم است می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. در بیشتر سازندهایی که واجد شرایط هستند، بار آستانه‌ای مته را می‌توان از آزمون‌های کاهش پیشروی که در بارهای بسیار کم مته انجام می‌گیرد بدست آورد. حد بالای تابع f_δ متناظر با نقطه‌ی افت کارایی مته بوده که می‌بایست از آزمون‌های کاهش پیشروی تعیین شود. ضرایب ثابت a_δ و a_ϵ را نیز می‌توان با استفاده از آزمون‌های کاهش پیشروی^۱ تعیین نمود. حدود تغییرات گزارش شده برای a_δ از ۰/۵ تا ۲/۰ و برای a_ϵ از ۰/۴ در سازندهای خیلی سخت تا ۱/۰ در سازندهای خیلی نرم است [Bourgoyne et al, 1991; Bourgoyne and Young, 1974].

۴-۷-۵- فرسودگی دندان، h

تابع f_v یا عبارت $a_v x_v$ تأثیر فرسودگی دندان بر نرخ نفوذ را مدل می‌کند. مقدار a_v عمدتاً به نوع مته بستگی دارد و کمتر به نوع سازند وابسته است. بطور کلی برای تخمین مقدار a_v می‌توان از مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی نرخ نفوذ در سازندهای مشابه و با شرایط عملیاتی مشابه در ابتدا و انتهای دوره‌ی کاری مته استفاده کرد. در هنگام استفاده از مته‌های با دکمه‌ی کربید تنگستن و مقادیر متوسط بار مته و سرعت دوران، مقدار فرسودگی مته غالباً ناچیز بوده و می‌توان از این عبارت صرف‌نظر کرد. بنابراین نمایه‌ی فرسودگی دندان، a_v ، صفر فرض می‌شود و بقیه‌ی نمایه‌ها، a_1 تا a_8 و a_ϵ در

1- Drilloff tests

رگرسیون شرکت داده می شوند. باید توجه داشت که وقتی h یا a_v صفر است، مقدار عبارت f_v یا $e^{a_v x_v}$ برابر با ۱ می باشد. مقادیر متعارف a_v برای مته های دندانه کنگره ای از ۰/۳ تا ۱/۵ است [Bourgoyne et al, 1991; Bourgoyne and Young, 1974].

۴-۷-۶- هیدرولیک مته

تابع f_8 تأثیر هیدرولیک بر نرخ نفوذ را مدل می کند. نیروی اعمالی جت مته به عنوان پارامتر هیدرولیکی مورد بررسی با مقدار نرمالیزه شده ی ۱/۰ برای f_8 در ۱۰۰۰ پوند انتخاب شده است. مقادیر متعارف a_8 از ۰/۳ تا ۰/۶ است [Bourgoyne et al, 1991].

هر چند، همانطور که در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده، انتخاب نیروی اعمالی جت اختیاری بوده و با استفاده از توان هیدرولیکی مته یا عدد رینولدز نازل بعنوان پارامتر هیدرولیکی مؤثر بر نرخ نفوذ می توان به نتایج مشابهی دست یافت [Bourgoyne et al, 1991]. گواه این مطلب استفاده از عدد رینولدز در مدل اولیه بعنوان پارامتر هیدرولیکی مؤثر است. در مدل اولیه عبارت $a_8 x_8$ تأثیر هیدرولیک مته بر نرخ نفوذ را مدل می کند. x_8 تعریف می شود:

$$x_8 = \frac{\rho q}{350 \mu d_n} \quad (12-4)$$

و از طریق آزمایش هایی که اِکل^۱ با میکرومته انجام داده بدست آمده است. اکل دریافت که نرخ نفوذ با گروه عدد رینولدز $\left(\frac{\rho q}{\mu d_n}\right)$ به توان ۰/۵ متناسب است که ρ وزن مخصوص گل (پوند بر گالن)، q نرخ جریان گل (گالن بر دقیقه)، μ گرانیوی ظاهری در ۱۰۰۰۰ بر ثانیه (سانتی پواز)، d_n قطر نازل های مته (اینچ) می باشد. از آنجایی که μ به راحتی قابل اندازه گیری و ثبت نیست، باید از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\mu = \mu_p + \tau_y / 20 \quad (13-4)$$

که در آن μ_p و τ_y به ترتیب گرانیوی پلاستیک بر حسب سانتی پواز (cp) و تنش تسلیم بر حسب پوند بر ۱۰۰ فوت مربع است [Bourgoyne and Young, 1974].

1- Eckel

در عمل، انتخاب بهترین مقادیر متوسط a_7 تا a_8 برای انواع سازندها در بازه‌ی عمقی مورد بررسی با احتیاط همراه است. با این حال، مقدار f_1 با استحکام سازند در حال حفاری تغییر می‌کند. عبارت f_1 دارای همان واحد نرخ نفوذ است و عمدتاً قابلیت حفاری (حفرپذیری) سازند نامیده می‌شود. قابلیت حفاری از نظر عددی معادل با نرخ نفوذی است که در یک نوع سازند معین (تحت تراکم نرمال)، با استفاده از یک مته‌ی جدید در عدم تعادل صفر، بار مته‌ی ۴۰۰۰ پوند بر اینچ، سرعت دوران ۶۰ دور در دقیقه و عمق ۱۰۰۰۰ فوتی بدست آید. قابلیت حفاری سازندهای مختلف را می‌توان به کمک داده‌های حاصل از چاه‌های قبلی در منطقه محاسبه کرد [Bourgoyne et al, 1991].

۴-۸- روش رگرسیون چند متغیره

در معادله‌ی ۴-۱۱ و جدول ۴-۱، روابط تابعی کلی نرخ نفوذ و دیگر متغیرهای حفاری تعریف شده است، اما برای استفاده از این معادلات ابتدا باید ضرایب ثابت a_7 تا a_8 را تعیین کرد. این ضرایب ثابت را می‌توان از آنالیز رگرسیون چند متغیره‌ی داده‌های حفاری حاصل از فواصل عمقی کوتاه و دارای جزئیات کافی بدست آورد.

اندیشه‌ی استفاده از آنالیز رگرسیون داده‌های حفاری‌های قبلی برای محاسبه‌ی ضرایب ثابت معادله‌ی نرخ حفاری، اندیشه‌ی جدیدی نیست. برای مثال، گراهام و مونچ^۱ در ۱۹۵۹ یکی از اولین مقالات را در مورد بهینه‌سازی حفاری ارائه دادند. این روش (رگرسیون خطی) توسط کامس^۲ نیز برای تعیین فشار منفذی سازند از داده‌های حفاری استفاده شده است. هر چند، بیشتر کارهای گذشته در این زمینه به دلیل عدم دسترسی آسان به حجم زیادی از داده‌های صحرایی مطمئن و دقیق و همچنین به خاطر نادیده گرفتن اثر خیلی از پارامترهای حفاری محدودیت پیدا می‌کردند، پیشرفت‌های اخیر در پایش در جای چاه برازش معادلات حفاری پیچیده‌تر را به آسانی ممکن ساخته است [Bourgoyne and Young, 1974].

1- Graham and Muench

2- Combs

به لحاظ نظری برای بدست آوردن هشت ضریب مجهول a_1 تا a_8 تنها هشت نقطه داده نیاز است. هر چند در عمل این مطلب وقتی درست است که معادله‌ی ۴-۱۱ فرآیند حفاری دورانی را با دقت ۱۰۰ درصد مدل کند و نیازی به گفتن نیست که این مطلب هرگز اتفاق نمی‌افتد. هنگامی که از نقطه داده‌های کمی برای آنالیز رگرسیون داده‌های صحرایی استفاده شود ممکن است گاهی مقادیر منفی هم برای یک چند ضریب ثابت رگرسیون حاصل شود. مطالعه‌ی حساسیت روی روش رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهد که تعداد نقطه داده‌های مورد نیاز برای رسیدن به نتایج معنی‌دار، تنها به دقت معادله‌ی ۴-۱۱ بستگی ندارد، بلکه به دامنه‌ی مقادیر پارامترهای حفاری x_2 تا x_8 نیز بستگی دارد. در جدول ۴-۲ حداقل دامنه‌ی مقادیر پیشنهادی برای هر پارامتر حفاری و حداقل تعداد نقطه‌ی مورد نیاز برای تحلیل رگرسیون آورده شده است. در صورتی که یکی از پارامترهای حفاری، x_j ، در طول بازه‌ی تحلیل رگرسیون اساساً ثابت نگه داشته شده باشد، مقدار ضریب ثابت رگرسیون متناظر با آن، a_j ، باید از مطالعات قبلی تخمین زده شود و تحلیل رگرسیون برای ضرایب ثابت باقی مانده انجام پذیرد. هرچه تعداد پارامترهای حفاری دخیل در رگرسیون کاهش یابد، حداقل تعداد نقاط مورد نیاز برای محاسبه بقیه‌ی ضرایب ثابت نیز کم می‌شود (جدول ۴-۲ را ببیند). در بیشتر موارد کاربردی، داده‌های بیش از یک چاه را باید با هم ترکیب کرد تا بتوان همه‌ی هشت ضریب ثابت رگرسیون را محاسبه نمود [Bourgoyne and Young, 1974].

جدول ۴-۲- حداقل دامنه‌ی پیشنهادی داده‌ها برای تحلیل رگرسیون [Bourgoyne and Young, 1974]

پارامتر	حداقل دامنه‌ی مقادیر	تعداد پارامترها	حداقل تعداد نقاط
x_2	۲,۰۰۰	۸	۳۰
x_3	۱۵,۰۰۰	۷	۲۵
x_4	۱۵,۰۰۰	۶	۲۰
x_5	۰/۴۰	۵	۱۵
x_6	۰/۵۰	۴	۱۰
x_7	۰/۲۰	۳	۷
x_8	۰/۵۰	۲	۴

نرخ نفوذ، بار مته و سرعت دوران را می بایست در فواصل عمقی کوتاه ثبت کرد تا این اطمینان بوجود آید که بیشتر اطلاعات ثبت شده تنها معرف یک نوع سازند هستند. می توان فاصله عمقی ۲ تا ۵ فوت برای بدست آوردن اطلاعات معرف، مبنا قرار دارد و همواره حجم داده های مورد نیاز را در محدوده ای منطقی حفظ کرد [Bourgoyne and Young, 1974].

برای استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره، ابتدا با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین معادله ی ۱۱-۴ داریم:

$$\ln \frac{dD}{dt} = 2/3 \cdot 3 a_1 + \sum_{j=2}^{\lambda} a_j x_j \quad (14-4)$$

اگر خطای باقیمانده نقطه ی i ام، (r_i) ، به صورت زیر تعریف شود:

$$r_i = 2/3 \cdot 3 a_1 + \sum_{j=2}^{\lambda} a_j x_j - \ln \frac{dD}{dt} \quad (15-4)$$

آنگاه، انتخاب a_1 تا a_{λ} می بایست به گونه ای باشد که برای n نقطه داده، که n عددی بزرگتر از ۸ است، مجموع مربع باقیمانده ها، $\sum_{i=1}^n r_i^2$ ، حداقل شود. لذا با استفاده از حساب دیفرانسیل داریم:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n r_i^2}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^n 2 r_i \frac{\partial r_i}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^n 2 r_i x_j = 0 \quad \text{برای } j = 1, 2, 3, \dots, \lambda$$

با حل همزمان دستگاه معادلات بدست آمده از بسط $\sum_{i=1}^n r_i x_j$ برای $j = 1, 2, 3, \dots, \lambda$ ، می توان

ضرایب ثابت a_1 تا a_{λ} را بدست آورد [Bourgoyne and Young, 1974].

$$\begin{cases} a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_3 \sum x_1 x_3 + \dots + a_{\lambda} \sum x_1 x_{\lambda} = \sum x_1 \ln \frac{dD}{dt} \\ a_1 \sum x_2 x_1 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2 x_3 + \dots + a_{\lambda} \sum x_2 x_{\lambda} = \sum x_2 \ln \frac{dD}{dt} \\ a_1 \sum x_3 x_1 + a_2 \sum x_3 x_2 + a_3 \sum x_3^2 + \dots + a_{\lambda} \sum x_3 x_{\lambda} = \sum x_3 \ln \frac{dD}{dt} \\ \vdots \\ a_1 \sum x_{\lambda} x_1 + a_2 \sum x_{\lambda} x_2 + a_3 \sum x_{\lambda} x_3 + \dots + a_{\lambda} \sum x_{\lambda}^2 = \sum x_{\lambda} \ln \frac{dD}{dt} \end{cases}$$

برای لحاظ کردن ضریب ثابت a_1 ۲/۳۰۳ در مدل اصلاح شده (معادله ی ۴-۱۱)، کافی است متغیر x_1 در دستگاه معادلات فوق برابر با ۲/۳۰۳ قرار داده شود و هنگامی که استفاده از مدل اولیه (معادله ی ۴-۹) مد نظر باشد، می توان مقدار x_1 را برابر با ۱ قرار داد.

جهت بررسی دقت روش محاسباتی و همبستگی نهایی مقادیر واقعی یا مشاهده ای (زیرنویس OB) و مقادیر محاسبه ای (زیرنویس C) از ضریب همبستگی رگرسیون، G ، استفاده می شود:

$$G = \sqrt{1 - \frac{\sum \left[\left(\ln \frac{dD}{dt} \right)_{OB} - \left(\ln \frac{dD}{dt} \right)_C \right]^2}{\sum \left[\left(\ln \frac{dD}{dt} \right)_{OB} - \left(\ln \frac{dD}{dt} \right)_{OB} \right]^2}} \quad (۴-۱۶)$$

در صورتی که تعدادی از ضرایب رگرسیون (a_j) از قبل مشخص باشند، می توان عبارت های متناظر $a_j x_j$ را به سمت چپ معادله ی ۴-۱۴ منتقل کرد و روش تحلیل رگرسیون را برای عبارت های باقیمانده استفاده کرد [Bourgoyne and Young, 1974].

در جدول ۴-۳ مقادیر متوسط ضرایب رگرسیون مدل حفاری بورگوین-یانگ برای سازندهای شیلی منطقه ی ساحلی خلیج آمریکا نشان داده شده است، این مقادیر می توانند به عنوان مبنایی برای ارزیابی حدود ضرایب رگرسیون مد نظر قرار بگیرند. همچنین در صورتی که هیچ داده ی حفاری قبلی برای تعیین ضرایب a_7 تا a_8 موجود نباشد، می توان از مقادیر این جدول استفاده کرد [Bourgoyne et al, 1991].

جدول ۴-۳- مقادیر متوسط ضرایب رگرسیون مدل حفاری بورگوین-یانگ

برای سازندهای شیلی منطقه ی ساحلی خلیج آمریکا [Bourgoyne et al, 1991]

a_8	a_7^*	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2
۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۹	35×10^{-6}	100×10^{-6}	90×10^{-6}

* مقادیر داده شده تنها برای مته های دندان کنه ای هستند. برای مته های دکمه ای از $a_7 = 0$ استفاده می شود.

۹-۴- حفاری بهینه

عبارت «بهینه سازی حفاری» اولین بار در بحث روش های انتخاب هیدرولیک مته های جت دار مطرح شد. این عبارت بعدها در مورد روش های انتخاب بار مته و سرعت دوران نیز توسعه یافت و در سطحی وسیع برای انتخاب نوع گل و خصوصیات آن، نوع مته و شرایط عملیاتی حاکم بر آن، و نوع لوله ی جداری و عمق نصب آن به کار گرفته شد [Bourgoyne and Young, 1974].

برای مواردی که فرسودگی دندان، عمر مته را محدود می کند، عبارت های تحلیلی نسبتاً ساده ای برای بهترین بار مته و سرعت دوران ثابت توسط بورگوین و یانگ ارائه گردیده است. با جابه جایی در معادله ی هزینه ی حفاری به ازای هر فوت یعنی معادله ی ۴-۱ می توان نوشت [Bourgoyne et al, 1991]:

$$C_f = \frac{C_r}{\Delta D} \left(\frac{C_b}{C_r} + t_b + t_c + t_t \right)$$

از ترکیب معادله ی فوق با معادلات مربوط به فرسودگی دندانهای مته که در اینجا بدلیل حجم بسیار زیاد محاسبات نیامده و گرفتن مشتق از معادله حاصل نسبت به بار مته و سرعت دوران، $(\partial C_f / \partial N) = 0$ و $(\partial C_f) / [\partial (W/d_b)] = 0$ ، دو معادله حادث خواهد شد. با حل همزمان این دو معادله برای (W/d_b) بار بهینه ی مته بصورت زیر بدست خواهد آمد [Bourgoyne et al, 1991]:

$$\left(\frac{W}{d_b} \right)_{opt} = \frac{a_\delta H_1 \left(\frac{W}{d_b} \right)_{max} + a_\epsilon \left(\frac{W}{d_b} \right)_t}{a_\delta H_1 + a_\epsilon} \quad (۱۷-۴)$$

اگر بار بهینه ی پیش بینی شده بوسیله ی این معادله از باری که پس از آن با افزایش بار، نرخ نفوذ کاهش می یابد^۱ (نقطه ی d شکل ۲-۱۱) بزرگتر باشد، می بایست از این بار کاهش دهنده ی نرخ نفوذ به عنوان بار بهینه استفاده شود. عمر بهینه ی مته و سرعت بهینه ی دوران را نیز می توان از معادله های زیر بدست آورد [Bourgoyne et al, 1991]:

$$t_b = \left(\frac{C_b}{C_r} + t_c + t_t \right) \left(\frac{H_1}{a_\epsilon} - 1 \right) \quad (۱۸-۴)$$

1- Flounder bit weight

$$N_{opt} = \phi \cdot \left[\frac{\tau_H \left(\frac{W}{d_b} \right)_{max} - \left(\frac{W}{d_b} \right)_{opt}}{t_b \left(\frac{W}{d_b} \right)_{max} - \phi} \right]^{1/H_1} \quad (۱۹-۴)$$

مقادیر H_1 ، H_2 و $(W/d_b)_{max}$ را می توان از جدول ۴-۴ که برای کلاس های مختلف مته های مخروط چرخشی پیشنهاد شده است، بدست آورد و τ_H ، ضریب ساینده گی سازند بر حسب ساعت است که برای هر سازند مقداری معین داشته و از روابط خاص خود قابل محاسبه است.

جدول ۴-۴- پارامترهای پیشنهادی فرسودگی دندان

برای مته های مخروط چرخشی [Bourgoyne et al, 1991]

$(W/d)_{max}$	H_2	H_1	کلاس مته
۷/۰	۷	۱/۹۰	۱-۲ تا ۱-۱
۸/۰	۶	۱/۸۴	۱-۴ تا ۱-۳
۸/۵	۵	۱/۸۰	۲-۲ تا ۲-۱
۹/۰	۴	۱/۷۶	۲-۳
۱۰/۰	۳	۱/۷۰	۳-۱
۱۰/۰	۲	۱/۶۵	۳-۲
۱۰/۰	۲	۱/۶۰	۳-۳
۱۰/۰	۲	۱/۵۰	۴-۱
۳/۰ تا ۵/۹	۱	۱/۵۰	مته های دکمه ای

متأسفانه، برای مواردی که عمر مته بوسیله ی عمر یاتاقان یا نرخ نفوذ محدود می شود، چنین معادلات ساده ای برای وضعیت بهینه یافت نشده و تشکیل جدول هزینه به ازای هر فوت بهترین روش است [Bourgoyne et al, 1991].



فصل پنجم

مدل سازی ترخ نفوذ با شبکه های

عصبی مصنوعی و و رگرسیون

خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



مدل سازی نرخ نفوذ با شبکه های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین - یانگ

۵-۱- مقدمه

در فصل های گذشته، مبانی شبکه های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از روش های کارآمد در مدل سازی مسائل غیرخطی مورد بحث واقع شد. همچنین روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ که یکی از روش های معمول در مدل کردن نرخ نفوذ بر اساس پارامترهای مؤثر حفاری است از نظر گذشت. اکنون وقت آن رسیده که توانایی این دو روش در قالب یک مثال واقعی به بوته ی آزمایش گذاشته شود. بدین منظور اطلاعات مربوط به حفاری هشت چاه در یکی از میادین هیدروکربوری واقع در خلیج فارس با مساعدت مشاور و یکی از شرکت های نفتی خصوصی در اختیار گرفته شد. البته بنا به درخواست شرکت مذکور، از ذکر نام شرکت و نام و موقعیت جغرافیایی میدان مورد نظر خودداری شده است. قبل از توضیح چگونگی انجام کار، بحث مختصری در مورد مشخصات زمین شناختی و سازندهای موجود در میدان مورد مطالعه صورت می گیرد و آنگاه جهت مدل سازی نرخ نفوذ به چگونگی طراحی شبکه عصبی مصنوعی و روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین- یانگ و مقایسه نتایج آنها پرداخته می شود.

۵-۲- سن و سنگ شناسی سازندها

سازندهای موجود در منطقه به ترتیب سن از جدید به قدیم به ترتیب زیر می باشد:

رسوبات عهد حاضر و گروه فارس: سنگ شناسی این رسوبات شامل آهک های سفید، کرم رنگ و سفید خاکستری همراه با خرده های فسیل با تناوبی از لایه های انیدریت و ژئپس سفید رنگ می باشد که به طرف قاعده آن بر میزان رسوبات تبخیری افزوده می شود.

سازند آسماری- چهارم: این سازند از آهکهای کرم، سفید متخلخل و آهکهای دولومیتی بامنشاء آلی تخریبی و خاکستری کمی رس دار و نیز دولومیت های قهوه ای با بلورهای ریز و درشت که در قسمت تحتانی با کانی گلوکونیت همراه است، تشکیل شده است. در قسمت قاعده درصد کمی از چرت در آهکها و دولومیت ها دیده می شود.

میوسن پایینی - پالتوسن

سازند ساچون: این سازند با ظاهر شدن انیدریت سفید سخت و دولومیت انیدریتی شروع می شود و درصد کمی انیدریت در سراسر سازند وجود دارد، این سازند کلاً از دولومیت سفید و سفید مایل به خاکستری متبلور و سخت گاهی انیدریتی تشکیل شده که بطرف قاعده به دولومیت قهوه ای بلورین تبدیل می گردد.

اوسن پایینی، پالتوسن پایینی

سازند سروک: بطور کلی این سازند از آهکهای کرم و قهوه ای روشن با بلورهای دانه متوسط و آهک های دانه ریز با منشاء آلی تخریبی تشکیل شده است که بتدریج در قاعده با مقداری شیل همراه می باشد، این سازند در قسمت میانی و تحتانی از دو بخش جداگانه به شرح زیر تشکیل شده است:

۱- بخش احمدی: این بخش از مارن خاکستری، خاکستری سفید چسبنده و شیل خاکستری با لایه های آهکی رس دار تشکیل شده که در قاعده مجدداً، تبدیل به شیل و مارن می شود.

۲- بخش مادود: این بخش از آهک های کرم رنگ و قهوه ای روشن با منشاء آلی تخریبی دانه ریز تشکیل شده است. سازند سروک در نبود رسوبات کرتاسه فوقانی (لافان و ایلام) بطور دگرشیب در زیر رسوبات بالایی خود قرار گرفته است.

سنومانین

سازند کژدمی: این سازند از شیل قهوه ای تا قهوه ای تیره، سبز روشن آهکی و متورق تشکیل شده که در قاعده آن یک لایه ماسه سنگ خاکستری و قهوه ای با دانه بندی متوسط تا درشت گلوکونیتی قرار گرفته است. لایه ماسه سنگی فوق معادل ماسه سنگ بورگان می باشد که در حوضه های

جنوبی و غربی خلیج فارس دارای شرایط مخزنی مناسبی می باشد. سازند کژدمی بطور دگرشیب بر روی رسوبات کرتاسه تحتانی قرار گرفته است.

آلبین

سازند داریان: شروع این سازند با ظاهر شدن آهک های کرم و قهوه ای رنگ متراکم و سخت متخلخل با منشاء آلی و تخریبی می باشد، کلاً از آهک های فوق و آهک های سفید خاکستری رسی به همراه لایه های نازکی از مارن و شیل که بطرف قاعده مجدداً از آهک های ریز بلور می باشد، تشکیل شده است.

آپتین

سازند گدوان: این سازند عمدتاً از آهک های روشن خاکستری، کرم رنگ دانه ریز سخت و تا حدودی رس دار تشکیل شده ، که بطرف قاعده آهک های کاملاً رسی همراه با لایه های نازک شیل و مارن دیده می شود. در قسمت میانی این سازند بخش خلیج قرار دارد که دارای خصوصیات مخزنی مناسب می باشد.

سازند فهلپان: این سازند با آهک خاکستری نخودی ترشیری و گاهی خاکستری و سفید خاکستری سیلیت دار و آهک قهوه ای روشن دانه ریز تا متوسط شروع می شود و از آهک های فوق و آهک کرم رنگ آلی تخریبی و بیتومن دار و سفید الیتی تشکیل شده که بطرف قاعده آهک به دولومیتی قهوه ای روشن تغییر می یابد.

نئوکومین

سازند هیث: شروع این سازند با پیدایش انیدریت سفید رنگ مشخص می شود و متشکل از تناوبی از لایه های انیدریت سخت، بلورین و دولومیت نخودی رنگ سخت و متراکم انیدریتی می باشد.

ژوراسیک بالایی

سازند سورمه: با شروع اولین لایه دولومیت قهوه ای روشن تا قهوه ای خاکستری زیر آخرین لایه انیدریت قاعده سازند هیث، سازند سورمه مشخص می باشد. سپس دولومیت هایی به رنگ خرمایی، نخودی، خاکستری و دولومیت متبلور و متخلخل بدون مواد رسی گاهی همراه با مواد آسفالتی در

نمونه‌های بدست آمده دیده می‌شود. در ادامه، این سازند شامل سنگ‌های آهکی سفید متمایل به کرم روشن، گچی و مقداری دولومیتی همراه با سنگ‌های آهکی سخت متبلور آواری آلی می‌باشد. "بخش ماند" در این سازند از آهک‌های سفید خاکستری کرم‌رنگ تمیز و به تدریج آهک‌های رس‌دار و لایه‌های نازک شیل و آهک‌های آواری تشکیل شده و در ادامه، بخش شیلی پایین سورمه که شامل آهک‌های رس‌دار و لایه‌های شیل می‌باشد و بالاخره در انتها لایه لیتیتوتیس که از دولومیت‌های قهوه‌ای روشن متمایل به خاکستری دانه شکری سخت و کریستالین تشکیل شده سازند سورمه را از نیریز جدا می‌سازد.

ژوراسیک میانی (دوگر)

سازند نیریز: این سازند با تناوبی از مارن خاکستری تیره و نرم و آهک‌های خاکستری رس‌دار و شیل‌های خاکستری تا سیاه رنگ متورق نیمه سخت گاهی آهک‌دار تشکیل یافته است، این سازند بطور دگرشیب بر روی سازند دشتک قرار گرفته است.

ژوراسیک تحتانی (لیاس)

سازند دشتک: بطور کلی این سازند با تناوبی از سنگ‌های کربناته، انیدریت و شیل تشکیل شده و قسمت‌های زیر در سازند دشتک قابل تشخیص است:

بخش تبخیری "B" از انیدریت سفید متبلور، انیدریت دولومیتی سفید و قهوه‌ای روشن، دولومیت انیدریتی به رنگ سفید مایل به خاکستری و سبز رنگ تشکیل شده است و بخش "A" از شیل‌های خاکستری و تیره، سنگ رس به رنگ‌های سبز و خاکستری و دولومیت قهوه‌ای نخودی و قهوه‌ای تشکیل شده است.

تریاس

سازند کنگان: با ظاهر شدن اولین لایه دولومیت نخودی مایل به خاکستری رس‌دار در زیر شیل‌های آغار شروع سازند کنگان مشخص می‌شود.

الف- بخش فوقانی (بخش A): شامل دولومیت خاکستری-نخودی مایل به خاکستری، بلورین و تخریبی آلی و لایه‌های نازکی از شیل به رنگ‌های سبز و سبز مایل به خاکستری می‌باشد.

ب- بخش گازدار (بخش B): بطور کلی این بخش شامل سنگ آهک و آهک دولومیتی سفید و سفید مایل به نخودی تا قهوه ای روشن بلورین شبه تخمکی متخلخل و تخریبی آلی تشکیل شده است. این قسمت دارای تخلخل مناسبی می باشد و یکی از بخش های مهم گازده سازند کنگان می باشد.

تریاس پایینی

سازند دالان: شروع این سازند از آهک دولومیتی سفید و قهوه ای روشن نسبتاً سخت، کمی رس دار و همراه با مواد قیری می باشد و با ظاهر شدن سنگواره های پرمین مشخص می شود و شامل سه بخش می باشد که دو واحد "C" و "D" به شرح زیر تشکیل شده است:

واحد "C": شامل دولومیت کرم رنگ نسبتاً سخت و دولومیت قهوه ای تیره بلورین تخمکی و آهک قهوه ای روشن و تیره آهک خاکستری تیره رس دار میکريت در بعضی قسمت ها تخریبی همراه با لایه های نازک شیل که در انتها به آهک نخودی خاکستری و نخودی قهوه ای بلورین سنگواره دار تبدیل می گردد.

واحد "D" (بخش گازدار سازند دالان): قسمت عمده این بخش از سنگ آهک نخودی تا خاکستری و قهوه ای روشن با منشاء تخریبی آلی اوولیتی با تخلخل زیاد و آهک قهوه ای خاکستری ریز بلور و مواد آلی و همچنین دولومیت قهوه ای روشن با منشاء آلی تخریبی متخلخل تشکیل شده است [ارحیمی، ۱۳۸۱]. در شکل ۵-۱ سن و سنگ شناسی سازندها آورده شده است.

۵-۳- چاه های مورد مطالعه

اطلاعات در اختیار گذاشته شده از جانب مشاور مربوط به هشت چاه A-2, A-3, B-1, B-2, C-1, C-2, C-3 و D-1 می باشد که موقعیت و وضعیت قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. بعضی از چاه هایی که با حروف یکسان نام گذاری شده اند، از یک نقطه ولی در جهت های مختلف حفاری شده اند. از بین سازندهای حفاری شده در این چاه ها، دو سازند داریان و سورمه برای انجام مدل سازی انتخاب شد که دلیل انتخاب این دو سازند در ادامه ذکر خواهد شد.

فصل پنجم- مدل سازی نرخ نفوذ با شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی بورگوین-یانگ

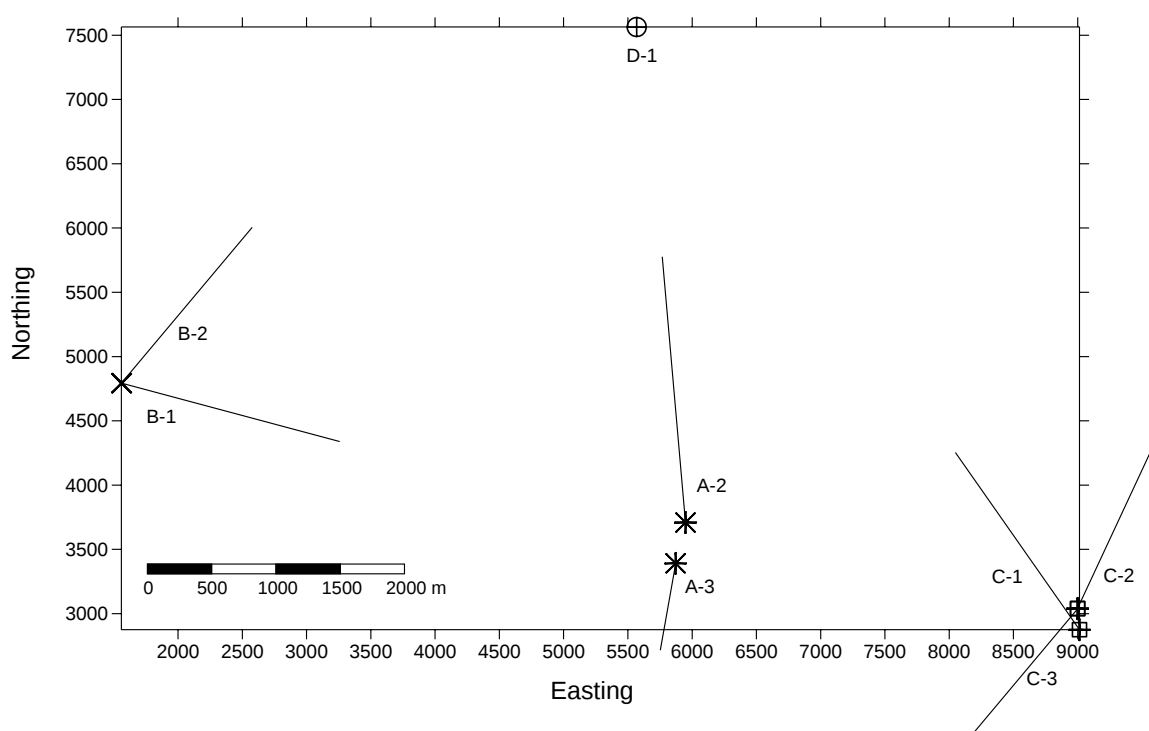
GEOLOGIC AGE		GRP/FORMATION	LITHOLOGY	LITHO-DESCRIPTION	ENVIRONMENT OF DEPOSITION
QUATERNARY		BOTTOM SEDIMENT			
TERTIARY	PLIOCENE-MIOCENE	FARS		Limestones: White, milky, anhydrite, organo detrital, glauc., with dolomite, white, fossiliferous vuggy and intercrystalline porosity Fossil: Echinoid, Gastropod, Bryozoa	SHALLOW SHELF
	MIOCENE-OLIGOCENE	ASMARI		Limestones: Milky, dolomitic, anhydritic, bituminous. Vuggy porosity Fossil: Volutinid, Litonella sp., Rotalia sp.,	
	EOCENE-PALEOCENE	JAHRUM		Dolomites: White, milky, crystalline, sugary, anhydrite. Limestone, White, med. hard, anhydritic traces of asphalt	
CRETACEOUS	MIDDLE	WASIA (SARVAK)	UPPER SARVAK	Limestones: White, cream, med. hard, dolomitic w/ chert, tr. oil Fossil: Nezzatta Dicyclina sp., Alveolina sp., Orbitulina sp.	DEEP - SHALLOW SHELF
			AHMADI	Marls: Gray, soft, sticky. Limestone bed: Light brown, dolomitic, med. hard, dense.	
			MAUDDUD	Limestones: White, cream, bioclastic, dolomitic, med. hard. Marls gray. Shales, greenish gray	DEEP-SHALLOW SHELF
			KAZHDUMI (NAHR UMR)	Interbedded Shales, limestones and sandstones Shales: Cho. brown, lt. gray, soft to med. hard Sandstones: Dk. brown, fine grn., poorly sorted, angular to semi spherical. Fossils: Cyclammina sp., Pseudocyclammina sp., Orbitolina sp.	
	LOWER	THAMAMA	DARIYAN (SHU'AIBA)	Dolomite: Dk. brown, sugary, med. to coarse crystal, brittle. good porosity filled w/ oil Limestones: Lt. gray, brown, fine crystalline and shale, brown, gray, soft and brittle Fossils: Salpingoporella dinarca, Orbiyulina concava, Choffatella sp., Dhukania sp.	SHALLOW SHELF
			GADVAN	Alternate of shales w/ marls and Limestones Fossils: Dictyoconus arabicus, Choffatella decipiens, Lenticulina sp.	DEEP SHELF
			FAHLIYAN	Limestones: White, cream, calcarenitic, pelletic, med. hard, interbedded w/ shales, gray green. Porosity-intercrystalline and fractures Fossils: Pseudocyclammina sp., Trochalina sp., Salpingoporella sp.	SHALLOW SHELF
	JURASSIC	UPPER	HITH	Anhydrites: White, cream, crystalline soft to med. hard, interbedded with Dolomites: Brown, med. to coarse crystalline, oolitic, compact and hard, oil shows	SHALLOW SHELF
			ARAB	Interbedded Dolomitic Limestones with Anhydrites. Descriptions as above with 'dead oil' and asphalt residue.	
		MIDDLE	SURMEH	Limestones interbedded w/ dolomites and anhydrites. Limestones: Cream, white, porous, med. hard, bioclastic, oolitic, crystal to sugary texture and hard. Dolomites: Lt. brown, sugary to fine crystal, slightly compact, traces of heavy oils. Fossils: Clupeina jurassica, Trocholina sp., Pfenderina sp., Kurnubia jurassica.	SHALLOW SHELF
		LOWER	NEYRIZ	Limestones: Cream, lt. gray to lt. brown, argillaceous, med. hard, dolomitic.	SHALLOW SHELF
TRIASSIC	LATE-MID	DASHTAK		Dolomites, Anhydrites, shales, clay and limestones Dolomites: Tan, off white, hard, microcrystalline, sucrosic, occasionally argillaceous	LAGOONAL
	EARLY	KANGAN		Dolomites w/ limestones beds, anhydrite and shales stringers. Dolomites: Tan, off white, translucent, med. hard to hard, microcrystalline, sucrosic, and occasionally argillaceous. Gas shows Limestones: White, off white to lt. brown, hard to med. hard, chalky, microcrystalline, oolitic, sli. argillaceous Fossils: Nummolestogina sp., Lunocommina sp., Pachypolia, Langela.	MARINE TO LAGOONAL
PERMIAN	EARLY	DALAN			
	LATE	FARAGHAN		Sandstones interbedded w/ limestones and shales Sandstones: Loose sand grains and muddy	MARINE PLATFORM

LEGEND :					
LIMESTONE	PELLETOID LIMESTONE	ARGILLACEOUS LIMESTONE	DOLOMITE	SHALE	MARL
PYRITE	ANHYDRITE	CHERT	SANDSTONE		

شکل ۵-۱- سن و سنگ‌شناسی (چینه‌شناسی) سازندها [رحیمی، ۱۳۸۱]

۴-۵- انتخاب و آماده سازی داده ها

با توجه به این که انتخاب محدوده ی کاری و داده های مورد استفاده در یک تحقیق تأثیر مستقیمی در مراحل انجام آن و نتایج حاصل خواهد داشت، می بایست در انتخاب داده ها نهایت دقت را به کار گرفت و مسائلی همچون محدودیت های ناشی از روش مورد استفاده در تحقیق، روند تغییرات پارامترهای مؤثر، هم پوشانی های احتمالی داده ها، مقادیر غیر عادی^۱ و کمبودها یا نقص های موجود در داده ها را مد نظر قرار داد.



شکل ۵-۲- موقعیت چاه ها نسبت به یکدیگر

اطلاعات در دسترس، شامل گزارش هایی بصورت فایل های متنی و صفحه گسترده و نگاره های پایش عملیات حفاری برای هشت چاه قائم و زاویه دار می باشد. در واقع برای هر چاه، مشخصات هندسی آن همانند شیب و جهت شیب حفاری و قطر چاه، مشخصات سازندهای مشاهده شده در طی حفاری، عمق قرارگیری و فشار منفذی آنها، نوع و خصوصیات گل مصرفی در فواصل عمقی مختلف، شدت جریان و وزن گل، مشخصات مته های بکار رفته و وضعیت فرسودگی آنها پس از استفاده،

1- Outliers

شرایط کاری حاکم بر مته از قبیل بار روی مته یا اصطلاحاً بار مته، سرعت دوران، گشتاور چرخشی و نرخ حفاری یا نرخ نفوذ در اختیار است.

قبل از آماده‌سازی داده‌ها برای استفاده در مدل‌های چند متغیره خطی و شبکه‌ی عصبی می‌بایست بازه‌ی عمقی پایش و ثبت اطلاعات برای چاه‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار داد و چاه‌هایی را که از این نظر دارای نقاط اشتراک هستند انتخاب نمود. در جدول ۵-۱ چاه‌های مختلف از نظر بازه‌ی عمقی برداشت نگاره‌های پایش عملیات حفاری و داده‌های خام سازنده‌ی این نگاره‌ها، اطلاعات مسیرنگاری چاه و سازندهای مشاهده شده مقایسه شده است (نگاره‌ها بصورت فایل‌هایی با قالب pdf تحت عنوان Master Log و Drilling Log و داده‌های خام سازنده‌ی آنها بصورت فایل‌های متنی تهیه شده‌اند، در شکل ۵-۳ نمونه‌ای از این نگاره‌ها برای چاه D-1 نشان داده شده است).

جدول ۵-۱- فواصل عمقی اطلاعات ثبت شده برای چاه‌های مختلف

عمق اندازه‌گیری شده ^۱ ، MD، (متر)						چاه
سازندها		مسیرنگاری		داده‌های خام و نگاره‌های پایش عملیات حفاری		
پایان	شروع	پایان	شروع	پایان	شروع	
۴۵۰۵	۱۱۹۰	۴۵۰۵	۰	۴۵۰۵ (عمق نهایی ^۲ ، TD)	۱۱۹۰	A-2
۳۹۰۵	۱۴۰۵	۳۹۰۵ (TD)	۲۶۶۲	۲۶۸۰	۱۵۰	A-3
۴۲۷۸/۵ (TD)	۲۰۳۱/۵	۴۲۷۸	۱۴۲۷	۴۲۷۸	۲۱۱۰	B-1
۴۰۰۱	۱۵۱۳	۳۹۵۹	۰	۴۰۰۱ (TD)	۱۴۵۰	B-2
۴۲۱۰	۱۴۹۰	۴۲۱۰	۰	۴۲۱۰ (TD)	۱۴۸۱	C-1
۴۰۷۵	۱۴۹۸	۴۰۷۵	۰	۴۰۷۵ (TD)	۱۴۹۸	C-2
۳۹۰۶	۲۱۳۷	۳۹۰۶	۲۱۰۰	۳۹۰۶ (TD)	۲۱۰۰	C-3
۴۵۶۲	۷۰۰	۴۵۶۲	۷۰۰	۴۵۶۲ (TD)	۷۰۰	D-1

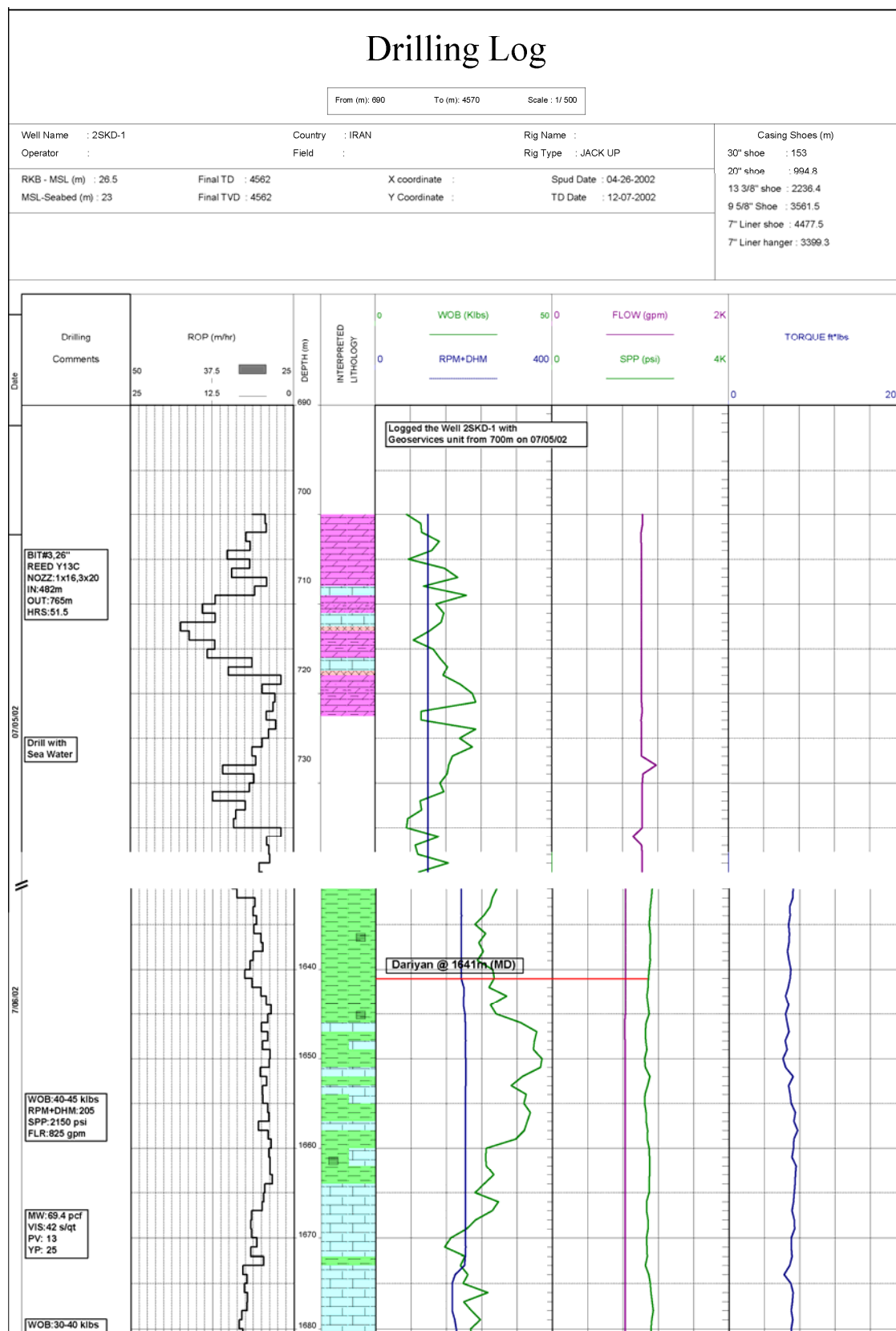
1- Measured depth

2- Total depth

با توجه به جدول ۵-۱ می‌توان دریافت که در چاه A-3، اطلاعات مربوط به مسیرنگاری در عمق بسیار بیشتری (۲۶۶۲ متر) در مقایسه با اطلاعات مربوط به نگاره‌ها و سازندها ثبت گردیده و این مسئله با توجه به کاربرد اطلاعات مسیرنگاری در محاسبه‌ی عمق قائم واقعی^۱ (TVD)، محاسبه‌ی این پارامتر را برای اعماق کمتر از ۲۶۶۲ متر که اطلاعات مربوط به نگاره‌ها و سازندها موجود هستند با مشکل مواجه خواهد کرد. لذا چاه A-3 از مجموعه‌ی چاه‌های حاضر در محاسبات حذف گردید. برای گزینش سایر چاه‌ها از دو معیار استفاده شد، یکی حداقل عمق مشترک ثبت اطلاعات و دیگری موقعیت چاه‌ها در میدان هیدروکربوری نسبت به یکدیگر (شکل ۵-۲). در مورد معیار اول حداقل عمق مشترک اطلاعات ثبت شده برای کلیه‌ی چاه‌های باقیمانده تقریباً ۲۱۰۰ متر است و این در حالی است که با حذف چاه‌های B-1 و C-3 می‌توان این عمق را به حدود ۱۵۰۰ متر رساند و اطلاعات مربوط به مناطق کم‌عمق‌تر را نیز در محاسبات لحاظ نمود. شایان ذکر است که در مناطق کم‌عمق‌تر این چاه‌ها بیشتر از مته‌های دندان کن‌های و دکمه‌دار استفاده شده و اساساً مدل چند متغیره خطی بورگوین برای این مته‌ها ارائه شده است و کاربرد این مدل در مناطق عمیق‌تر که حفاری بیشتر با مته‌های PDC صورت گرفته امکان‌پذیر نیست. از منظر معیار دوم یعنی موقعیت چاه‌ها نیز برای حذف چاه‌های B-1 و C-3، با توجه به نزدیکی این دو چاه به چاه‌های B-1، C-1 و C-2 و جهت حفر این دو چاه که به سمتی مخالف با فضای بین سایر چاه‌ها است مانعی وجود ندارد. به این ترتیب از مجموع هشت چاه، پنج چاه A-2، B-2، C-1، C-2 و D-1 برای شرکت در مدل‌سازی مد نظر قرار گرفتند.

از آنجایی که اطلاعات فوق‌الذکر در فایل‌های مختلف قرار داشت و استفاده و پردازش آنها به این شکل میسر نبود، این اطلاعات با توجه به نحوه‌ی استفاده‌ی آنها در مدل‌های چند متغیره خطی و شبکه‌ی عصبی بصورت ستون‌هایی برای هر پارامتر در قالب یک فایل صفحه گسترده‌ی اکسل برای هر چاه جمع‌بندی شد. در فایل مذکور، داده‌های متعلق به هر سازند و مته‌هایی که در حفاری آن سازند شرکت داشته‌اند نیز مشخص گردیدند.

1- True vertical depth



شکل ۵-۳- نمونه ای از نگاره های پایش و ثبت پارامترهای حفاری مربوط به چاه D-1

برای آن که بتوان دو روش مورد استفاده در مدل سازی نرخ نفوذ را با هم مقایسه کرد، تصمیم بر آن شد که داده های مربوط به سازندهای مشابه در چاه های مختلف در قالب یک فایل داده ای قرار بگیرند و داده های مورد نیاز برای آموزش و یا اعتبارسنجی در روش شبکه ی عصبی و محاسبه ی ضرایب رگرسیون در روش رگرسیون چند متغیره بورگوین-یانگ و همچنین داده های مورد نیاز برای آزمایش این دو روش بصورت تصادفی از درون فایل داده ای هر سازند انتخاب شود. در جدول ۵-۲ بخشی از فایل آماده شده برای سازند داریان نشان داده شده است. از بین مجموعه ی سازندها، می بایست سازندهایی انتخاب شوند که متدهای استفاده شده در حفاری آنها، از نوع متدهای مخروط چرخشی باشد زیرا همانطور که گفته شد مدل بورگوین-یانگ، اساساً برای این نوع متدها ارائه شده است. البته در مورد شبکه ی عصبی این محدودیت وجود ندارد و می توان آن را برای هر نوع سازند و متدهای به کار گرفت. در مدل سازی های آزمایشی اولیه، دو سازند داریان و سورمه برای انجام کار انتخاب شدند. یکی از دلایل این انتخاب، قرارگیری این دو سازند در فازهای حفاری با قطرهای متفاوت است. همانطور که در بخش ۲-۴-۱-۱ فصل دوم اشاره شد، عملیات حفاری در فازهایی با قطرهای مختلف طراحی می گردد که در فازهای ابتدایی قطر چاه بزرگتر بوده و هر چه به عمق می رویم، در فازهای بعدی از میزان قطر چاه کاسته می شود. سازند داریان در تمامی چاه ها در فاز $17\frac{1}{4}$ اینچ واقع شده در حالی که بخش هایی از سازند سورمه در برخی چاه ها در فاز $17\frac{1}{4}$ اینچ واقع شده و بخش هایی در فاز $12\frac{1}{4}$ اینچ قرار گرفته است. دلیل دیگر انتخاب این دو سازند، بررسی پاسخ شبکه ی عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره در مواجهه با حجم داده های متفاوت در این دو سازند است.

جدول ۵-۲- نمونه ای از فایل مرتب شده اولیه داده ها برای سازند داریان

Well code	MD (m)	TVD (m)	ROP (m/h)	WOB (klb)	RPM (rpm)	FLW (gpm)	MW (pcf)	PV (cp)	YP (lb/100)	gp (ppg)	Hole size (in)	Csg size (in)	DP size (in)	DC size (in)	L-BHA (ft)	H1	H2	(W/d) _m	hf	TFA (sq. in)
71	1642	1642	6.43	32	199	825	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
71	1643	1643	5.05	37	199	826	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
71	1644	1644	4.26	32.4	199	825	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
71	1645	1645	3.54	34.1	202	827	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
71	1646	1646	4.02	41	203	817	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
71	1647	1647	5.02	45.5	202	817	69.5	13	25	8.75	17.5	20	5	9	450	1.5	2	10	0.25	0.785
44	1813	1748.79	6.68	21.1	114	899	73	10	17	8.75	17.5	20	5	8	375.67	1.5	2	10	1	1.316
44	1814	1749.73	7.12	25.7	165	902	73	10	17	8.75	17.5	20	5	8	375.67	1.5	2	10	1	1.316
44	1815	1750.67	6.15	28.5	156	906	73	10	17	8.75	17.5	20	5	8	375.67	1.5	2	10	1	1.316
44	1816	1751.61	8.97	29.3	89	894	73	10	17	8.75	17.5	20	5	8	375.67	1.5	2	10	1	1.316
44	1817	1752.55	12.13	32.4	89	893	73	10	17	8.75	17.5	20	5	8	375.67	1.5	2	10	1	1.316
75	1747	1723.33	11.38	33.2	162	945	69.5	11	16	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227
75	1748	1724.28	12.42	36.5	163	945	69.5	11	16	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227
75	1749	1725.23	7.89	37.2	163	945	69.5	11	16	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227
85	1750	1726.18	5.01	29.6	162	943	70.3	10	17	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227
85	1751	1727.13	2.6	33.7	163	943	70.3	10	17	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227
85	1752	1728.08	2.42	35.8	163	943	70.3	10	17	8.75	17.5	20	5	9	402.58	1.5	2	10	1	1.227

MD: عمق اندازه گیری شده (متر)، TVD: عمق قائم واقعی (متر)، ROP: نرخ نفوذ مته (متر در ساعت)، WOB: بار مته (کیلو پوند)، RPM: سرعت دوران مته (دور در دقیقه)، FLW: نرخ (شدت) جریان گل (گالن در دقیقه)، MW: وزن مخصوص گل (پوند بر فوت مکعب)، PV: گرانشی پلاستیک گل (سانتی پواز)، YP: تنش تسلیم گل (پوند بر ۱۰۰ فوت مربع)، gp: گرادیان فشار منفذی سازند (پوند بر گالن)، Hole size: قطر چاه (اینچ)، Csg size: قطر لوله ی جداری (اینچ)، DP size: قطر لوله ی حفاری (اینچ)، DC size: قطر طوق مته ی حفاری (اینچ)، L-BHA: طول تجهیزات ته چاهی (فوت)، H1، H2 و (W/d)_m: پارامترهای فرسودگی دندانهای مته، hf: فرسودگی نهایی کسری دندان، TFA: مساحت کلی نازل های مته (اینچ مربع)

تعداد داده های آماده شده برای سازندهای داریان و سورمه از چاه های مختلف به ترتیب ۶۳۵ و ۲۵۸۰ داده است که در هر متر از این چاه ها اندازه گیری و ثبت شده اند. با نگاهی اجمالی به داده ها مواردی مشاهده می شود که نرخ نفوذ نوسان زیادی پیدا می کند، این شرایط بیشتر در نقاطی رخ می دهد که یا مته به دلیل فرسودگی تعویض شده و یا فاز حفاری جدیدی با قطر کمتر آغاز شده است به عبارت دیگر حفاری، در نزدیکی محل قرارگیری پاشنه ی لوله جداری در جریان است. برای کاهش دادن اثر این نوسانات، با پیشنهاد مشاور تصمیم گرفته شد، برای فواصل عمقی مختلف به عنوان مثال ۲ متر، ۳ متر، ۴ متر و یا ۵ متر داده ها با هم ترکیب^۱ شوند یعنی برای مثلاً هر ۳ متر یک داده با میانگین گیری تعیین شود. برای انجام این کار به نحوی که اطلاعات مربوط به هر چاه یا مته های مختلف در یک چاه با هم ترکیب نشوند، برای هر چاه و مته های مربوط به آن یک کد در نظر گرفته

شد، که برنامه های تهیه شده، از این کدها برای شناسایی چاه ها و مته های جدید در فایل داده ای هر سازند استفاده می کند. این کدها برای پنج چاه D-1، C-1، C-2، B-2 و A-1 به ترتیب ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ می باشد و برای هر مته، شماره ی آن مته در آن چاه است. در ستون اول جدول ۵-۲ می توانید این کدها را برای سازند داریان ملاحظه کنید.

۵-۵- مدل سازی نرخ نفوذ با استفاده از شبکه ی عصبی پس انتشار خطا

برای انجام مدل سازی با شبکه ی عصبی مصنوعی، ابتدا باید پارامترهای ورودی و خروجی شبکه را مشخص کرد. از آنجایی که هدف این مطالعه، مقایسه ی نتایج شبکه ی عصبی و رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ است، برای مشخص نمودن پارامترهای ورودی به شبکه عصبی، می بایست متغیرهای تشکیل دهنده ی مدل بورگوین-یانگ را مد نظر قرار داد. علاوه بر آن، باید بررسی کرد که آیا این متغیرها اندازه گیری و ثبت شده اند، به عبارت دیگر در داده های تحت اختیار، وجود دارند یا خیر. بر این اساس پنج پارامتر عمق قائم واقعی (TVD)، بار روی مته (WOB)، سرعت دوران مته (RPM)، نرخ جریان گل (FLW) و وزن مخصوص گل (MW) که در مدل بورگوین-یانگ حضور دارند، به عنوان پارامتر ورودی و لگاریتم طبیعی نرخ نفوذ، $\ln(ROP)$ ، به عنوان پارامتر خروجی مشخص شدند.

۵-۶- طراحی شبکه ی عصبی پس انتشار خطا

برای طراحی و ایجاد شبکه در این مطالعه، از جعبه ابزار شبکه ی عصبی نرم افزار MATLAB استفاده گردید. مزیت بزرگ نرم افزار MATLAB بهره گیری از جعبه ابزارها و توابع پیش ساخته است.

۵-۶-۱- نرمال کردن داده ها

قبل از ورود داده ها به شبکه، جهت افزایش کارایی شبکه بهتر است ابتدا داده ها نرمال شوند. توابع محرک مورد استفاده در اغلب شبکه ها نیاز به قرار گرفتن ورودی هایشان در یک گستره ی محدود مثلاً بین $[-1, 1]$ دارند. داده های ارائه شده به نرون های ورودی ممکن است بر اساس نوع

اندازه گیری دارای مقادیر بسیار متفاوت باشند و چنانچه آن ها در یک گستره ی محدود قرار نگیرند، امکان دارد که شبکه نسبت به مقدار یکی از نرون های ورودی حساس تر شود حتی اگر بزرگی این مقادیر مربوط به واحد اندازه گیری باشد. از دیگر مزایای قرار دادن ورودی ها در یک گستره ی محدود، جلوگیری از رشد زیاد وزن ها می باشد. این محدودیت، مدت زمان همگرایی شبکه و حصول کمینه خطا را کاهش می دهد. داده های خروجی نیز غالباً جهت آموزش دادن به شبکه نرمال می شوند و قبل از آنالیز نتایج به واحدهای اصلی برگردانده می شوند. نرمال کردن، روش های مختلفی دارد که به عنوان نمونه می توان به تقسیم مقادیر به بزرگترین عدد آن ها و یا تقسیم به نرم مقادیر ورودی اشاره کرد [طهماسبی، ۱۳۸۳].

در اینجا برای نرمال کردن داده ها در بازه ۱ تا ۱- در طراحی شبکه پس انتشار (BPNN) از دستور premnmx استفاده گردید که از رابطه ی
$$p_n = 2 \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} - 1$$
 برای نرمال کردن استفاده می کند و در آن p داده اولیه و p_n داده نرمال شده است. البته در این تحقیق فقط ورودی های شبکه نرمال شد و برای خروجی از لگاریتم طبیعی نرخ نفوذ استفاده شد. استفاده از لگاریتم داده ها به جای خود داده ها، معمولاً در مواردی که گستره ی تغییرات داده ها بسیار زیاد باشد صورت می گیرد. دو دلیل عمده برای نرمال نکردن خروجی می توان برشمرد، اول این که لگاریتم گرفتن از مقادیر اولیه ی نرخ نفوذ، خود نوعی نرمال کردن می باشد که نتیجه، در بازه های متفاوت از ۱ تا ۱- است. دیگر این که اگر خروجی نرمال شود، بعد از آموزش و تعمیم، نتایجی که شبکه پیش بینی می کند داده های نرمال شده است و باید با توجه به داده های آموزشی به حالت عادی برگردانده شود که خالی از اشکال نیست و باعث افزایش خطا خواهد گردید.

این مسئله در مدل سازی های اولیه که در آن از مقدار اصلی نرخ نفوذ به عنوان خروجی شبکه استفاده شده بود، به وضوح دیده می شد. به این صورت که به ازای مقادیر نرمال شده ی ورودی، شبکه دارای پاسخ های منفی برای نرخ نفوذ بود. حال آن که نرخ نفوذ اساساً دارای مقداری مثبت است. استفاده از لگاریتم طبیعی نرخ نفوذ، این مشکل را برطرف کرد.

۵-۶-۲- انتخاب نوع تابع فعالیت برای نرون های لایه پنهان و لایه خروجی

مدل سازی داده ها در گروه مسائل تقریب تابع قرار می گیرد. مطابق آنچه در راهنمای نرم افزار MATLAB گفته شده، بهترین عملکرد شبکه ی عصبی در حل این مسائل هنگامی حاصل می شود که از تابع محرک تانژانت هایپربولیک در لایه های پنهان و از تابع محرک خطی در لایه ی خروجی استفاده شود [راهنمای نرم افزار MATLAB، ۲۰۰۲].

۵-۶-۳- انتخاب روش آموزشی مناسب

الگوریتم آموزشی پس انتشار خطا بر اساس روش کاهش شیب عمل می کند. ضعف عمده ی این الگوریتم، سرعت کم همگرایی آن و نیز توقف یادگیری شبکه به دلیل به دام افتادن پارامترهای شبکه در نقاط کمینه ی محلی می باشد.

در روش های کاهش شیب مقدار نرخ یادگیری در مدت آموزش ثابت نگه داشته می شود. به بیان دیگر در الگوریتم پس انتشار خطا وزن ها همواره با یک ضریب ثابت (نرخ یادگیری) از مشتق جزئی خطا نسبت به وزن ها تصحیح می شوند. روش های آموزشی مختلفی وجود دارد که در آن ها نرخ یادگیری در طول فرآیند یادگیری تغییر می کند. در جدول ۵-۳ برخی الگوریتم های آموزشی موجود در نرم افزار MATLAB آورده شده است. در این تحقیق، برای آموزش شبکه در روش توقف سریع از الگوریتم آموزشی لوببرگ- مارکوآرت (trainlm) به دلیل سرعت همگرایی بسیار بالا و عملکرد مناسب در مورد مسائل تقریب تابع استفاده شده است. در روش منظم سازی نیز از الگوریتم منظم سازی بیزین (trainbr) استفاده شده است.

جدول ۵-۳- الگوریتم های آموزشی مختلف در نرم افزار MATLAB [Demuth and Beale, 2002]

دستور MATLAB	توضیحات	الگوریتم
traincgf	کمترین حافظه را در بین الگوریتم های گرادین توأم نیاز دارد.	Fletcher-Reeves conjugate gradient
traincgp	حافظه بیشتری نسبت به روش traincgf نیاز دارد و عموماً سریع همگرا می شود.	Polak-Ribière conjugate gradient
traincgb	اندکی حافظه بیشتر از روش traincgp نیاز دارد و عموماً سریع همگرا می شود.	Powell-Beale conjugate gradient
trainscg	تنها الگوریتم توأمی می باشد که احتیاج به جستجوی خطی ندارد.	Scaled conjugate gradient
trainbfg	احتیاج به حافظه برای تخمین ماتریس هسیان ^۱ دارد و در هر تکرار محاسبات بیشتری نسبت به روش گرادین توأم دارد، اما با تعداد تکرار کمتری همگرا می شود.	BFGS quasi-Newton
trainoss	حد واسطی بین دو روش گرادین توأم و روش trainbfg می باشد.	One step secant
trainlm	سریعترین الگوریتم آموزشی برای شبکه های معمولی است. در اجرای این روش، وقتی که شبکه آموزشی بزرگ باشد در حین انجام آموزش، حافظه مورد استفاده به تدریج کاهش می یابد.	Levenberg-Marquardt
trainbr	اصلاح شده ی الگوریتم لونبرگ-مارکوارت که تولید شبکه هایی می کند که به خوبی تعمیم می یابند. مشکل تعیین ساختار شبکه بهینه را حل می کند.	Bayesian regularization
trainrp	دارای الگوریتم آموزش دسته ای ساده با همگرایی سریع است و حافظه کمی نیاز دارد.	Resilient backpropagation
traingd	این شبکه از لحاظ زمانی دیرتر به جواب می رسد و می تواند در روش های نموی ^۲ آموزش استفاده شود.	Basic gradient descent.
traingdx	از روش traingd سریعتر است، اما فقط در آموزش دسته ای ^۳ می توان از آن استفاده کرد.	Adaptive learning rate
traingdm	معمولاً از روش traingd سریعتر است و می توان از آن در روش های نموی آموزش استفاده کرد.	Gradient descent with momentum

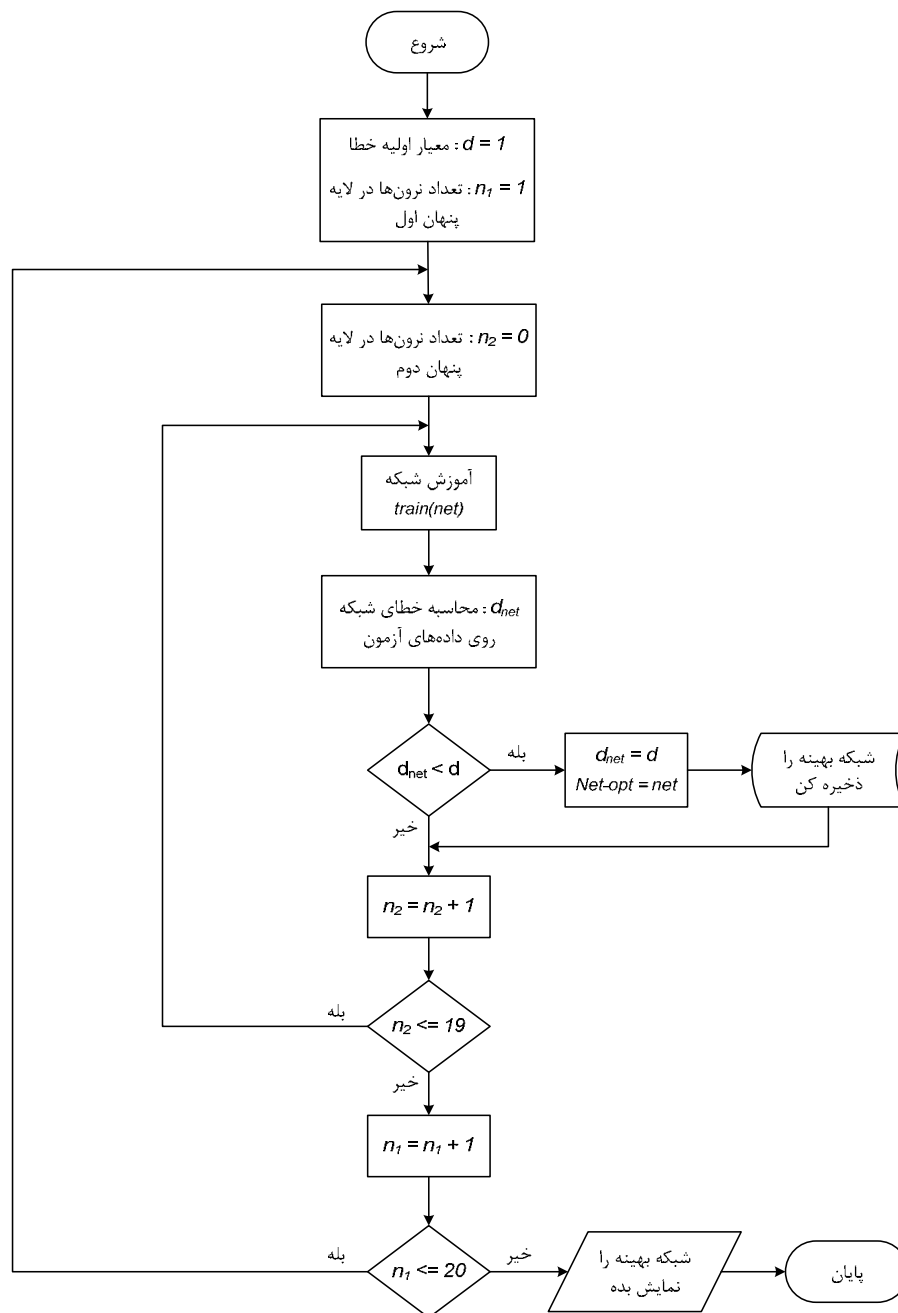
1- Hessian matrix
2- Incremental
3- Batch mod training

۵-۶-۴- تعیین ساختار بهینه ی شبکه

جهت طراحی شبکه در این تحقیق از دو روش توقف سریع و منظم سازی استفاده گردید. در هر دو روش برای پیدا کردن ساختار بهینه ی شبکه یعنی تعداد لایه های پنهان و تعداد نرون های لایه پنهان از یک الگوریتم که نمودار گردشی آن در شکل ۵-۴ آمده است استفاده شد. حداقل و حداکثر تعداد نرون ها برای لایه ی پنهان اول ۱ و ۲۰ و برای لایه ی پنهان دوم صفر و ۱۹ در نظر گرفته شد. در مجموع، برنامه ۴۰۰ حالت مختلف را برای یافتن ساختار بهینه ی شبکه بررسی می کند. در مدل سازی های اولیه همواره تعداد بهینه ی نرون های لایه های پنهان در درون این بازه ها قرار می گرفت و جواب های قابل قبولی بدست می آمد، لذا با توجه به زمان بر بودن محاسبات از بررسی شبکه های بزرگ تر صرف نظر شد. در الگوریتم مذکور یافتن شبکه ای که در آن خطای داده های آزمون حداقل باشد، پایه و اساس کار را تشکیل می دهد یعنی در هر بار تکرار در صورتی که خطای داده های آزمون در شبکه ی جدید کمتر از شبکه ی قبلی باشد، شبکه ی جدید به همراه وزن ها و بایاس های آن ذخیره می شود. ادامه ی این روند منجر به یافتن ساختار شبکه ای با حداقل خطا می شود.

۵-۶-۵- طراحی شبکه ی پس انتشار به روش توقف سریع

در روش توقف سریع از تعداد ۶۳۵ داده (الگو) موجود برای سازند داریان و ۲۵۸۰ داده موجود برای سازند سورمه، حدود ۷۰ درصد داده ها به صورت تصادفی به عنوان داده های آموزش، حدود ۱۰ درصد به عنوان داده های آزمون (که در داده های آموزش نبودند) و حدود ۲۰ درصد به عنوان داده های اعتبارسنجی (که در داده های آموزش نبودند) انتخاب شدند. علت انتخاب درصد بالای داده ها برای آموزش این است که شبکه الگوهای حاکم بر ورودی ها و خروجی ها را ببیند و خود را با شرایط متفاوت تطبیق دهد. شبکه به کمک داده های آموزش تعلیم می بیند و در حین آموزش با سری داده های اعتبارسنجی مورد آزمایش قرار می گیرد تا با انتخاب تکرارهای مناسب همان طور که در بخش ۳-۱۰ توضیح داده شد، متوقف شود. سپس با داده های آزمون تعمیم دهی شبکه ارزیابی می شود.



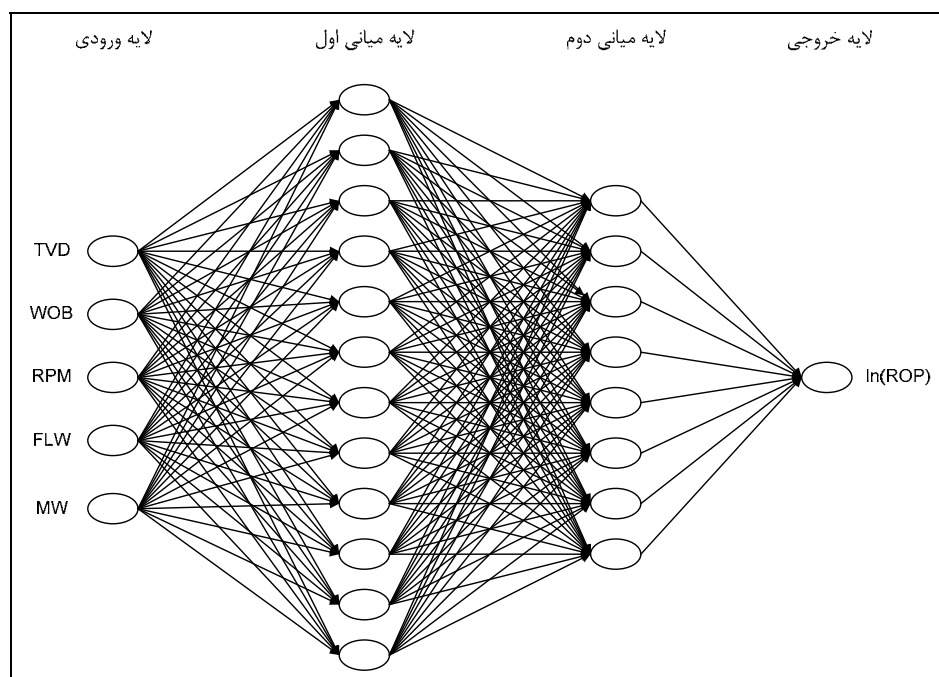
شکل ۵-۴- نمودار گردش تعیین ساختار بهینه‌ی شبکه

برای بدست آوردن شبکه پس انتشار بهینه در روش توقف سریع، همانطور که اشاره شد از الگوریتم طراحی شده برای این منظور، همراه با تابع آموزشی لونیبرگ- مارکوآرت و تابع ارزیابی^۱ میانگین مربعات خطا (MSE) برای ارزیابی و محاسبه‌ی حداقل خطا استفاده گردید. به منظور مقایسه و ارزیابی شبکه‌های بدست آمده برای فواصل ترکیبی مختلف سازندهای داریان و سورمه در همه‌ی

1- Performance Function

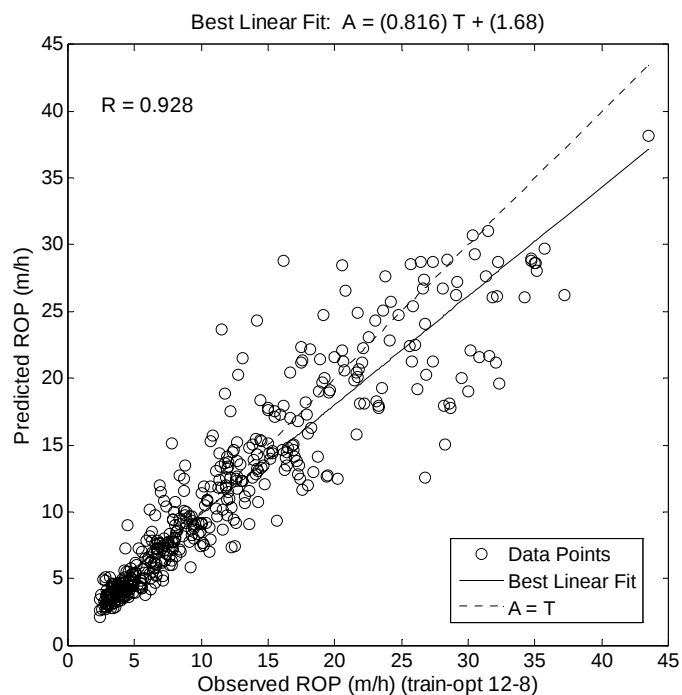
روش های بکار گرفته شده در این تحقیق، از دو فاکتور ضریب همبستگی (R) و جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) استفاده گردید که این دو فاکتور باید در مراحل مختلف یادگیری (آموزش، اعتبارسنجی و آزمون) دارای شرایط خوبی باشند. همانطور که می دانید جذر میانگین مربعات خطا میانگین بزرگی خطا را اندازه گیری می کند. از آنجایی که خطاها قبل از میانگین گیری مربع می شوند، RMSE به خطاهای بزرگ وزن نسبتاً بیشتری اختصاص می دهد. دامنه ی تغییرات RMSE از صفر تا بی نهایت بوده و هرچه مقادیر آن به صفر نزدیک تر باشد تخمین به شکل مطلوب تری انجام شده است.

شبکه ی بهینه بدست آمده برای فواصل ۱ متری سازند داریان دارای یک لایه ورودی با پنج نرون (TVD, WOB, RPM, FLW, MW) و یک لایه خروجی با یک نرون (لگاریتم نرخ نفوذ) و تابع محرک خطی، دو لایه پنهان با تعداد ۱۲ نرون در لایه پنهان اول و ۸ نرون در لایه پنهان دوم با تابع محرک تانژانت هایپربولیک برای هر دو لایه می باشد. در شکل ۵-۵ ساختار این شبکه به صورت شماتیک آمده است. شبکه ی بهینه برای فواصل ۱ متری سازند سورمه دارای ساختار ۵-۱۰-۱۳-۱ با توابع محرک تانژانت هایپربولیک و خطی برای لایه های پنهان و خروجی است.

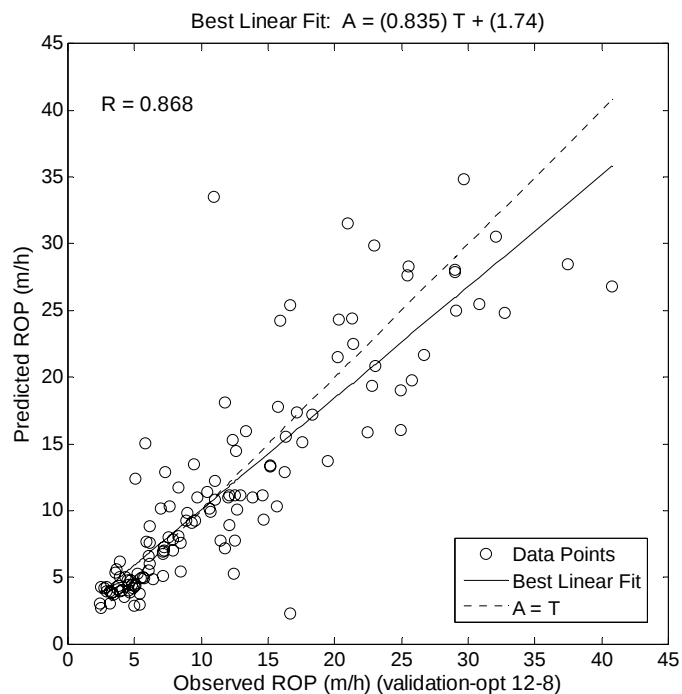


شکل ۵-۵- نمای کلی از ساختار شبکه پس انتشار خطا در روش توقف سریع و تعداد لایه های آن برای فواصل ۱ متری سازند داریان

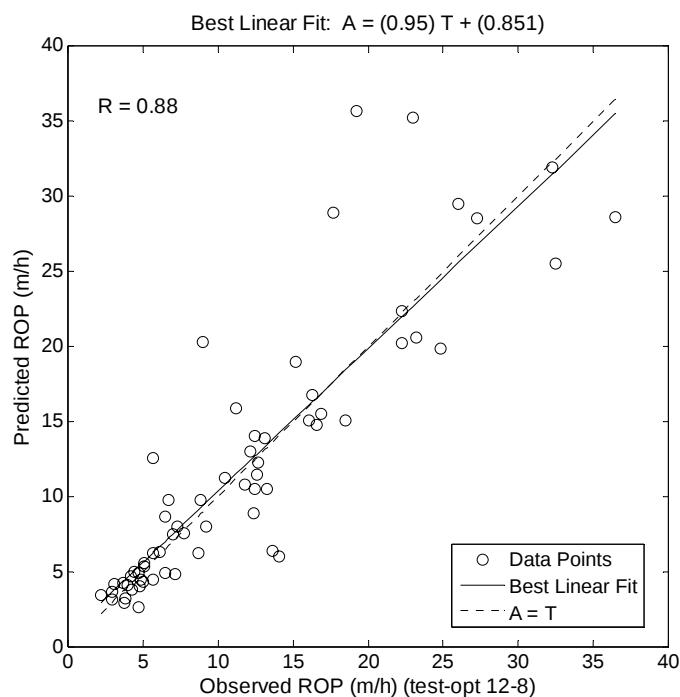
ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای سه مجموعه داده ی آموزش، اعتبار سنجی و آزمون در شکل های ۵-۶ تا ۵-۸ و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای سه مجموعه داده ی آموزش، اعتبار سنجی و آزمون در شکل های ۵-۱۲ تا ۵-۱۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل های ۵-۶ تا ۵-۸ و ۵-۱۲ تا ۵-۱۴ دیده می شود، هر کدام از این نمودارها دارای خط برازش شده ای بین پاسخ شبکه و نرخ نفوذ اندازه گیری شده هستند. این خط دارای یک شیب و ضریب همبستگی است که پراکندگی داده ها را حول خط برازش شده نشان می دهد، هر چه مقدار ضریب همبستگی و شیب خط به عدد ۱ نزدیک تر باشد ($A=T$)، پراکندگی داده ها حول خط برازش کمتر و نشان از پیش بینی خوب می باشد. همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای سه سری داده ی آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۷ و ۰/۸۸ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۷۵ و ۰/۸۱ می باشد. جذر میانگین مربعات اختلاف مقادیر نرخ نفوذ اندازه گیری شده و نرخ نفوذ پیش بینی شده که از این پس به اختصار جذر میانگین مربعات خطا خوانده می شود برای فواصل ۱ متری سازند داریان برای سه سری داده ی آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر با ۳/۱۸۲، ۴/۲۹۶ و ۴/۱۹۸ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون به ترتیب برابر ۳/۶۵۹، ۴/۶۳۳ و ۴/۱۵۴ می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بالای بدست آمده توسط شبکه، می توان به قابلیت خوب شبکه های طراحی شده اشاره نمود و از این شبکه ها برای تخمین نرخ نفوذ در حفاری چاه های بعدی در سازند داریان و سورمه استفاده نمود. در شکل های ۵-۹ تا ۵-۱۱ و ۵-۱۵ تا ۵-۱۷ نیز مقایسه ی بین نرخ نفوذ شبکه با نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازندهای داریان و سورمه برای سه سری داده در مقابل تعداد داده های هر سری آورده شده است که نرخ نفوذ اندازه گیری شده با علامت ستاره و نرخ نفوذ پیش بینی شده به صورت منحنی نشان داده شده است. نتایج مربوط به استفاده از فواصل عمقی (فواصل ترکیبی) مختلف به جای فاصله ۱ متری برای سازندهای داریان و سورمه در روش توقف سریع در انتهای همین فصل در جدول ۵-۵ آمده است.



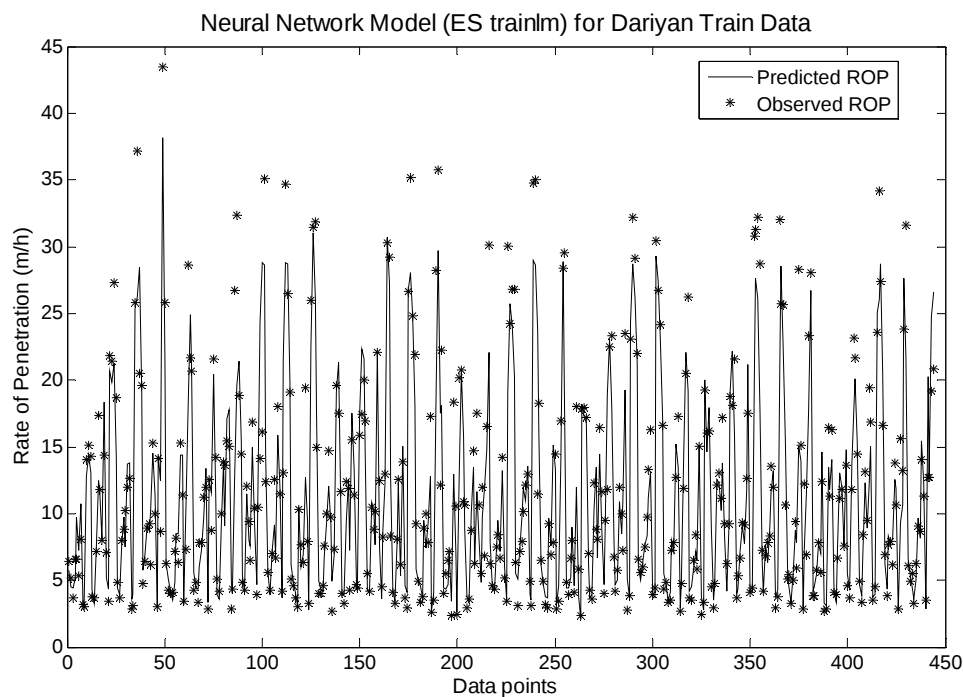
شکل ۵-۶- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع



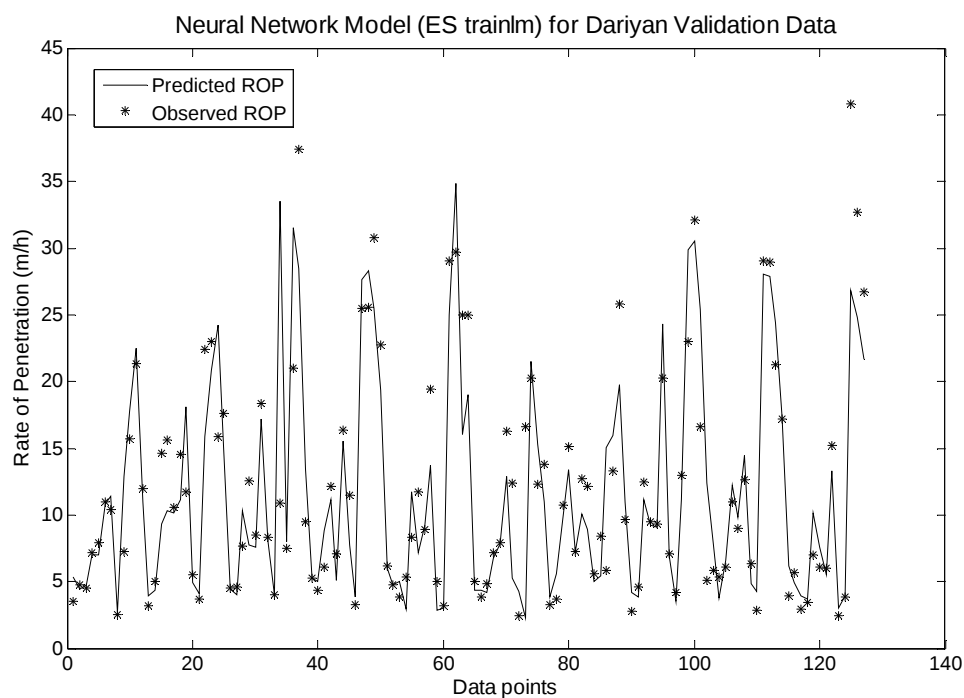
شکل ۵-۷- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع



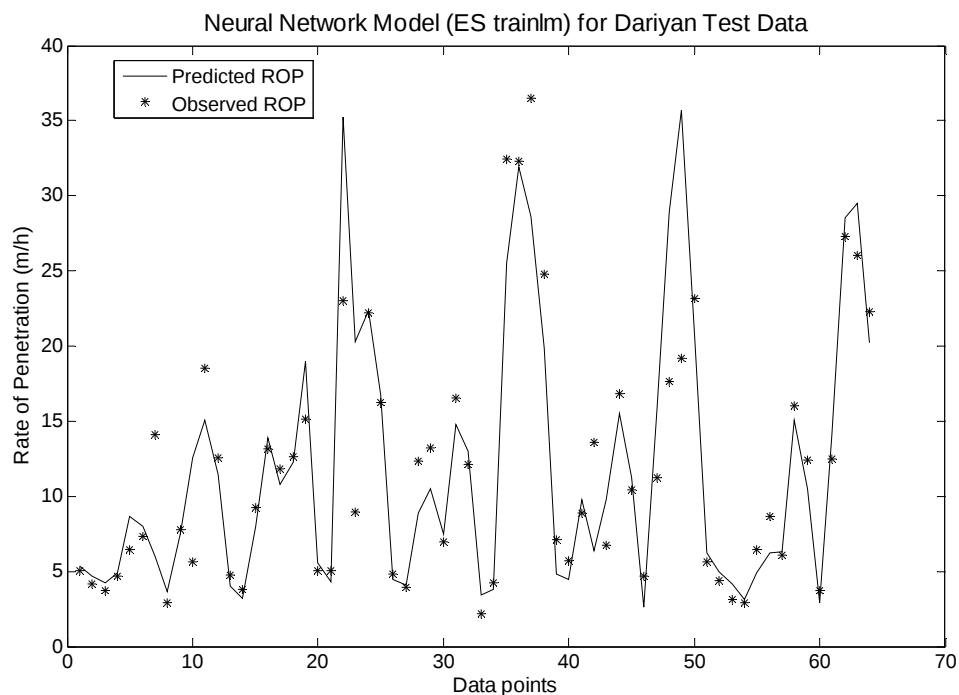
شکل ۵-۸- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع



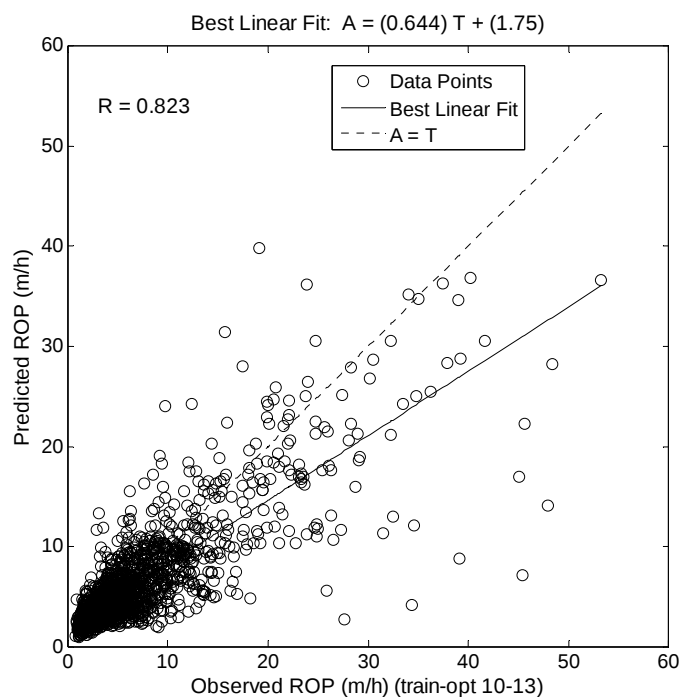
شکل ۵-۹- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع



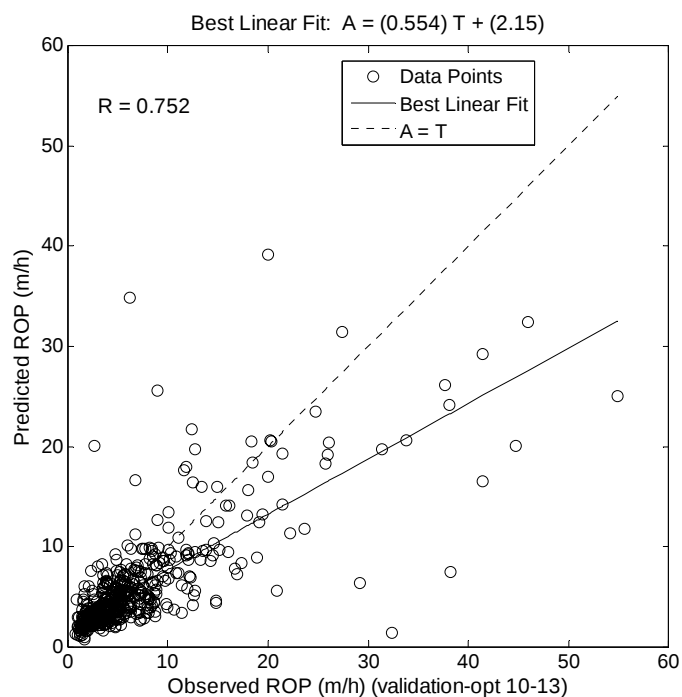
شکل ۵-۱۰- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع



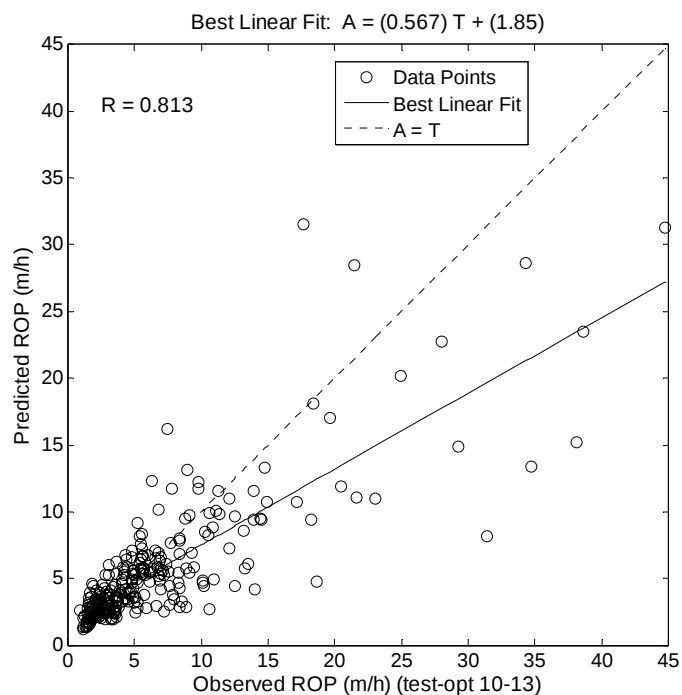
شکل ۵-۱۱- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع



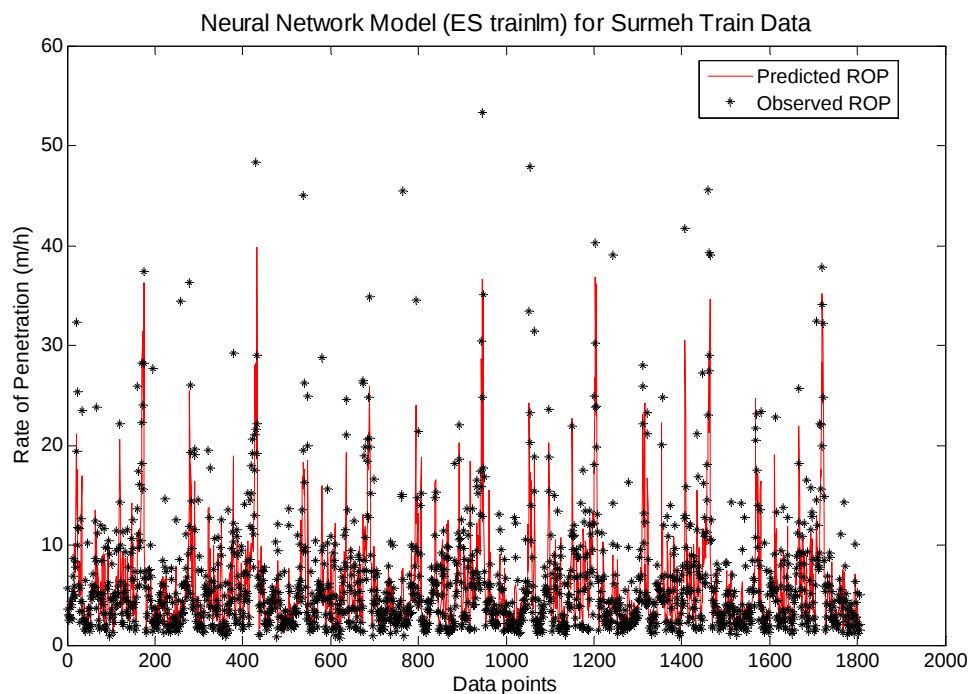
شکل ۵-۱۲- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع



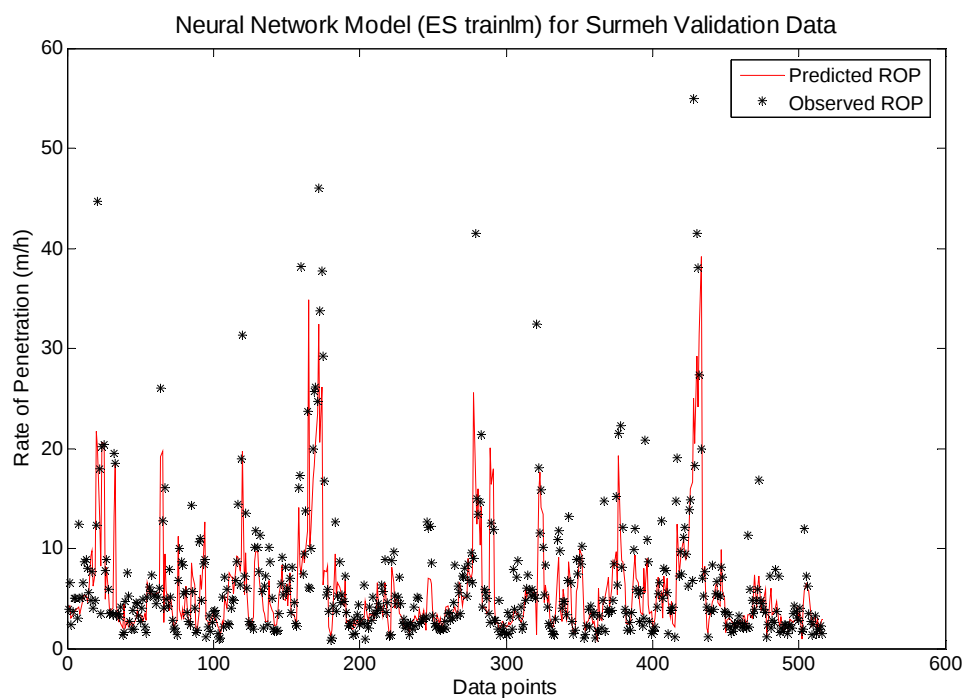
شکل ۵-۱۳- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع



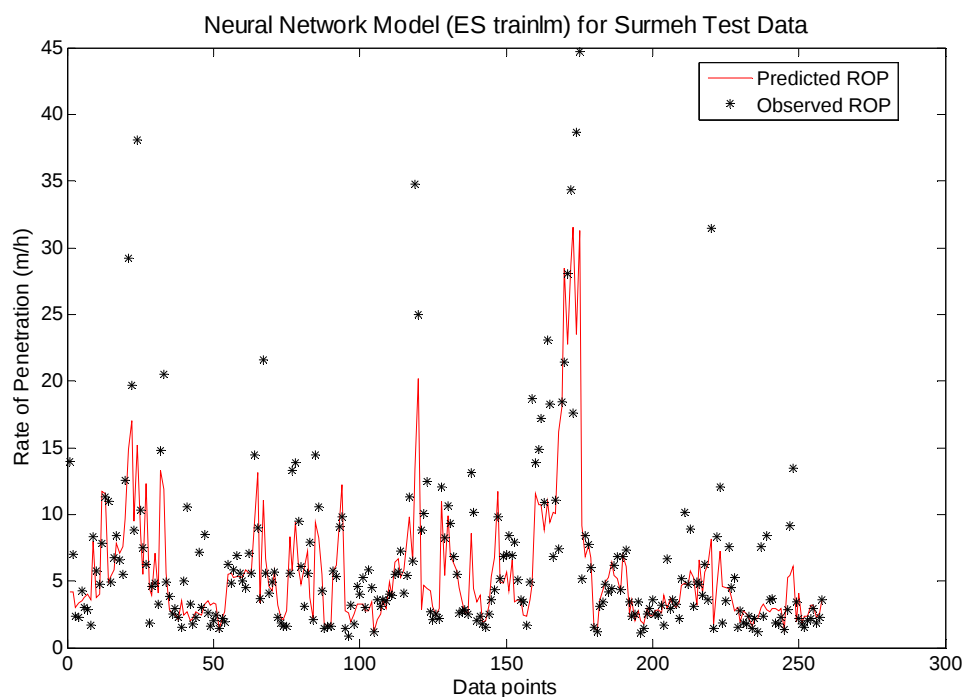
شکل ۵-۱۴- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع



شکل ۵-۱۵- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش توقف سریع



شکل ۵-۱۶- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های اعتبارسنجی در روش توقف سریع



شکل ۵-۱۷- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش توقف سریع

۵-۶-۶- طراحی شبکه ی پس انتشار به روش منظم سازی

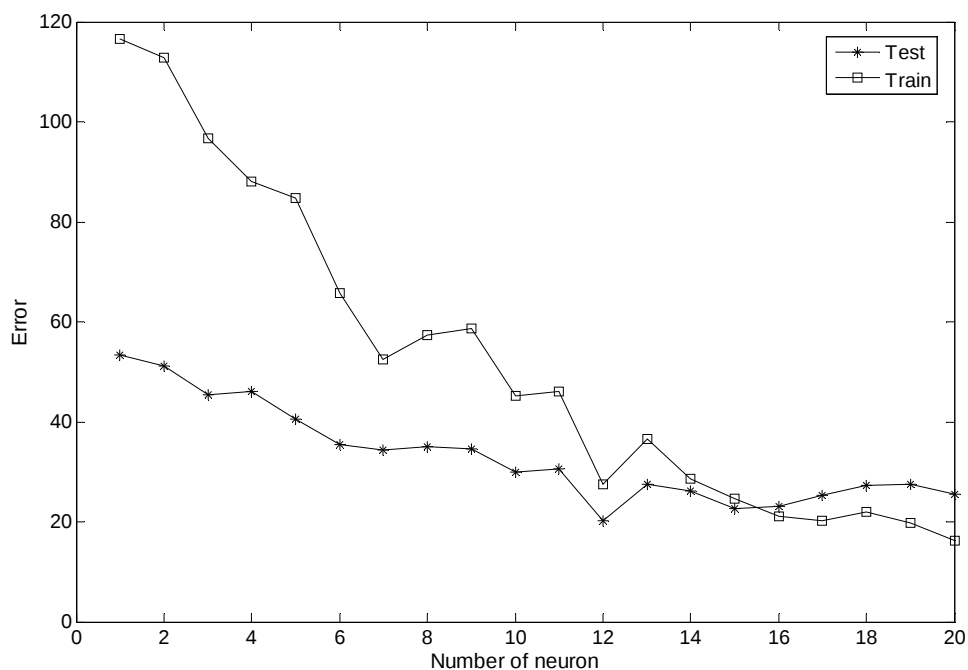
در روش منظم سازی بر خلاف روش توقف سریع، از دو سری داده یکی برای آموزش شبکه و دیگر برای آزمون قابلیت تعمیم دهی شبکه استفاده می گردد. به عبارتی از داده های آموزش در روش توقف سریع برای آموزش شبکه (۷۰٪ داده ها) و از داده های اعتبارسنجی و آزمون (۳۰٪ داده ها) برای آزمایش شبکه استفاده می شود. در این روش می توان برای آموزش شبکه از توابع آموزش مختلف (جدول ۵-۳) همراه با تابع ارزیابی MSEREG به جای تابع MSE استفاده نمود. ولی در این مطالعه از تابع آموزش trainbr که به صورت اتوماتیک روش منظم سازی را اجرا می کند و به صورت پیش برنامه در نرم افزار MATLAB وجود دارد، استفاده گردید. همان طور که قبلاً توضیح داده شد، این روش از مجموع مربعات خطا و وزن ها برای آموزش استفاده می کند. در هنگام اجرای الگوریتم trainbr وقتی تغییرات آنها به ازای تکرار معینی از الگوریتم ثابت شود، آموزش شبکه متوقف و وزن ها و بایاس های شبکه ثابت می گردند. این روش نسبت به روش توقف سریع برای به جواب رسیدن زمان بیشتری لازم دارد. به خصوص وقتی تعداد لایه های پنهان و نرون ها زیاد می شوند، همگرایی شبکه بسیار کند می شود و احتمال بیش برازش بالا می رود. به همین دلیل برای بدست آوردن شبکه بهینه با این روش، تعداد لایه های پنهان دوم در الگوریتم تعیین ساختار بهینه ی شبکه صفر منظور گردید در واقع شبکه ای با یک لایه ی پنهان مد نظر قرار گرفت. در شکل ۵-۱۸، نمودار حاصل از عملکرد الگوریتم تعیین ساختار بهینه ی شبکه برای محاسبه تعداد نرون های لایه ی پنهان در روش منظم سازی برای فواصل ۱ متری سازند داریان نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می کنید حداقل خطای شبکه برای داده های آزمون با تعداد ۱۲ نرون در لایه ی پنهان اتفاق می افتد. شایان ذکر است این نمودار در روش توقف سریع به دلیل تعداد زیاد ترکیب های حاصل از نرون ها در دو لایه ارائه نشده است. پس از بررسی نتایج، با توجه به ضریب همبستگی و RMS و همچنین سرعت به جواب رسیدن شبکه، شبکه ای با همان پنج ورودی که در روش توقف سریع انتخاب شده بودند، در نظر گرفته شد که برای فواصل ۱ متری سازند داریان دارای یک لایه پنهان با تعداد ۱۲ نرون و تابع محرک تانژانت هایپربولیک و یک لایه خروجی با یک نرون (لگاریتم نرخ نفوذ) و تابع محرک خطی می باشد. ساختار

کلی شبکه به صورت شماتیک در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. شبکه ی بهینه در روش منظم سازی برای فواصل ۱ متری سازند سورمه دارای ساختار ۵-۱۷-۱ با توابع محرک تانژانت هایپربولیک و خطی برای لایه های پنهان و خروجی است.

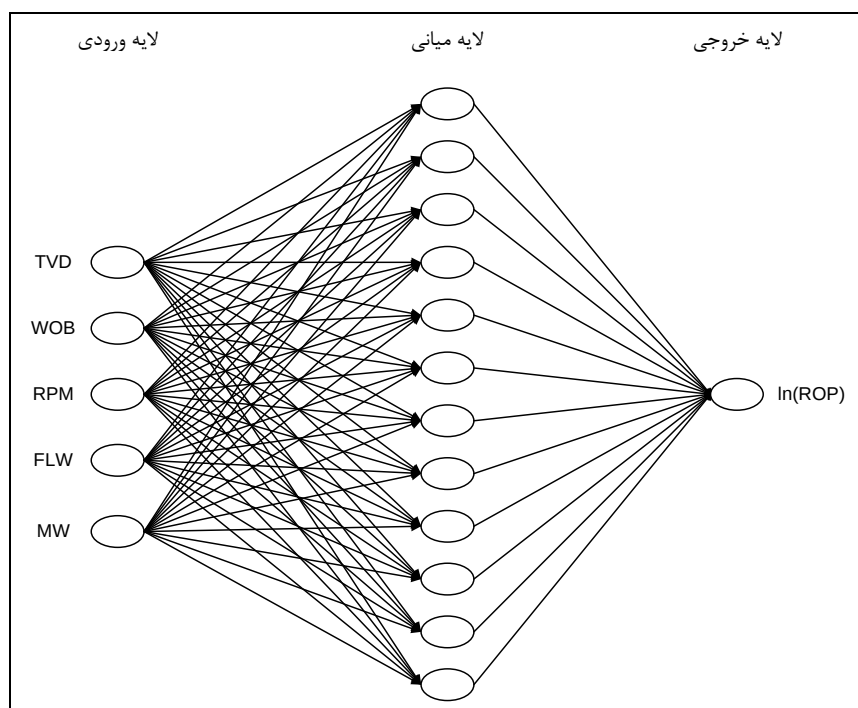
ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای دو مجموعه داده ی آموزش و آزمون در شکل های ۵-۲۰ و ۵-۲۱ و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش و آزمون در شکل های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ نشان داده شده است. همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۲ و ۰/۸۸ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۸۴ و ۰/۸۰ می باشد. جذر میانگین مربعات خطا برای فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۳/۳۳۲ و ۴/۰۰۵ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۳/۵۱۷ و ۴/۲۶۰ می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بالای بدست آمده توسط شبکه، می توان به قابلیت خوب شبکه های طراحی شده اشاره نمود و از این شبکه ها برای تخمین نرخ نفوذ در حفاری چاه های بعدی در سازند داریان و سورمه استفاده نمود. در شکل های ۵-۲۲ و ۵-۲۳ نیز مقایسه ی بین نرخ نفوذ شبکه با نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش و آزمون در مقابل تعداد داده های هر سری آورده شده است که نرخ نفوذ اندازه گیری شده با علامت ستاره و نرخ نفوذ پیش بینی شده به صورت منحنی نشان داده شده است.

نتایج مربوط به استفاده از فواصل عمقی مختلف به جای فاصله ۱ متری برای سازندهای داریان و سورمه در روش منظم سازی در انتهای همین فصل در جدول ۵-۵ آمده است.

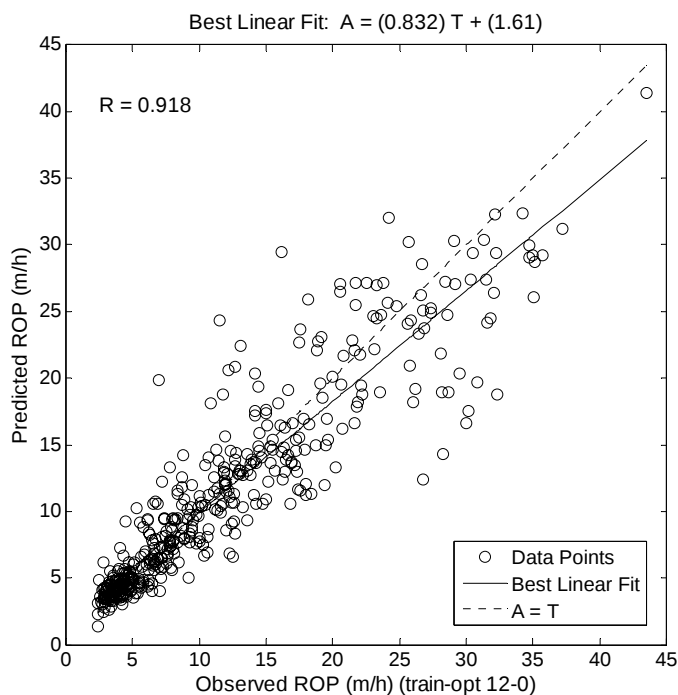
با توجه به ضرایب همبستگی مراحل مختلف آموزش و همچنین سرعت همگرایی شبکه در دو روش مذکور، روش توقف سریع در سطح بهتری مقادیر نرخ نفوذ را پیش بینی کرده است. لذا در کل روش توقف سریع نسبت به روش منظم سازی ترجیح داده می شود.



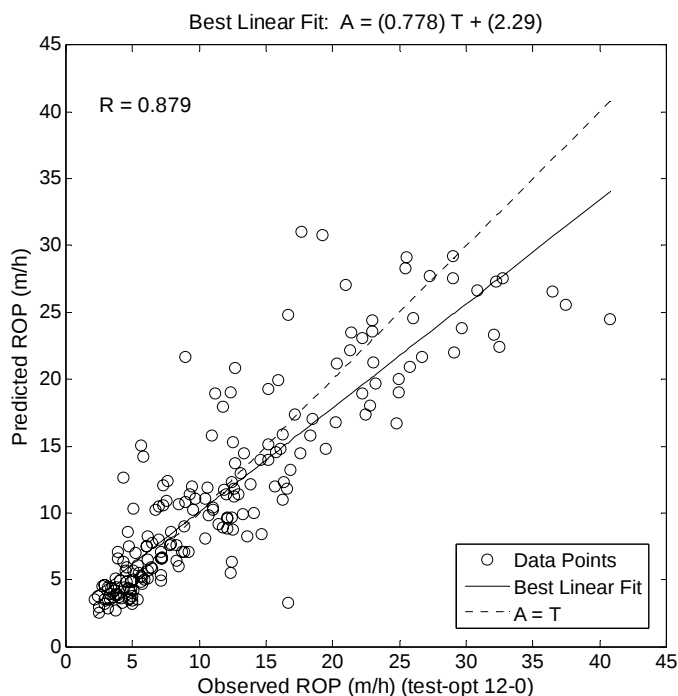
شکل ۵-۱۸- نمودار تعیین تعداد نرون های لایه پنهان در روش منظم سازی برای فواصل ۱ متری سازند داریان



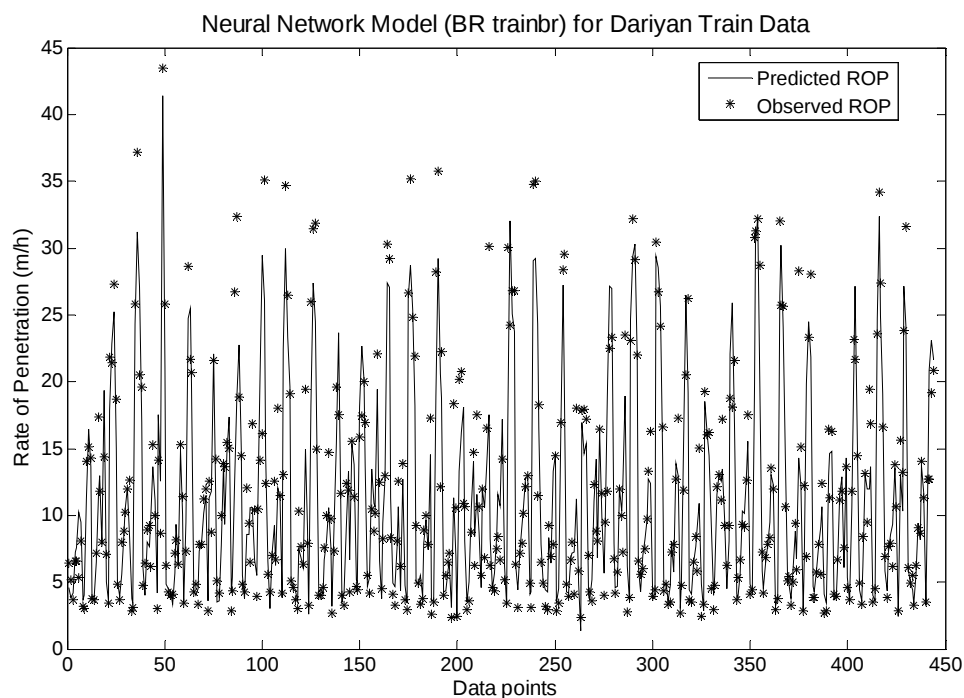
شکل ۵-۱۹- نمای کلی از ساختار شبکه پس انتشار خطا در روش منظم سازی و تعداد لایه های آن برای فواصل ۱ متری سازند داریان



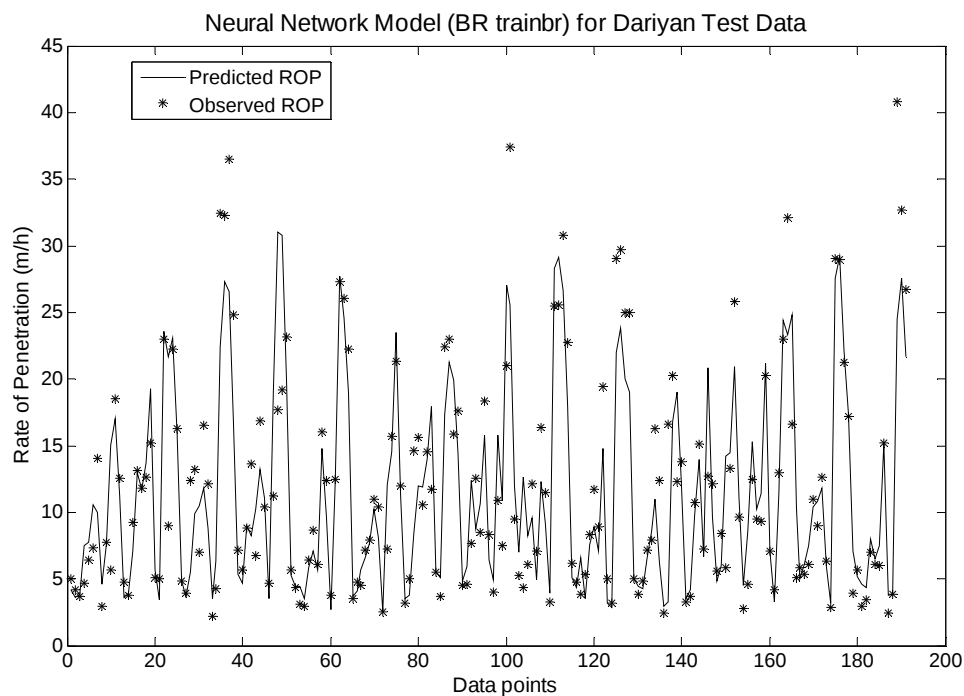
شکل ۵-۲۰- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی



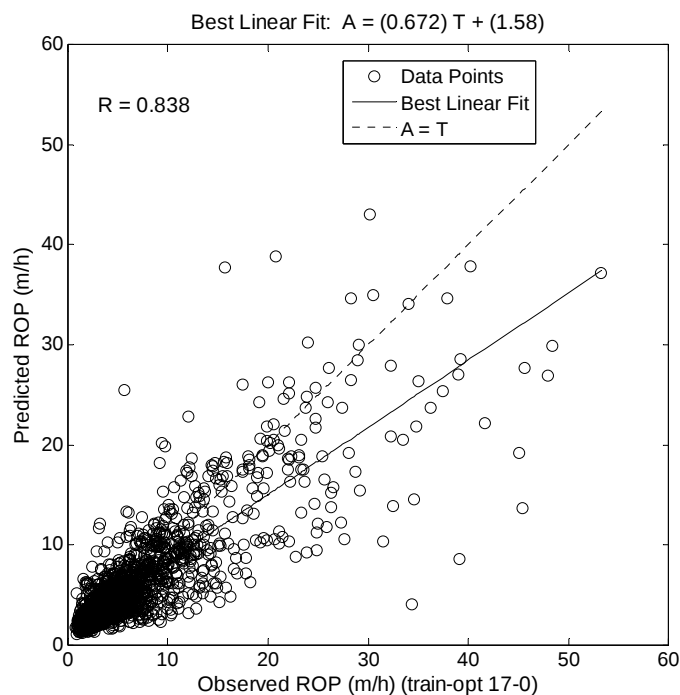
شکل ۵-۲۱- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی



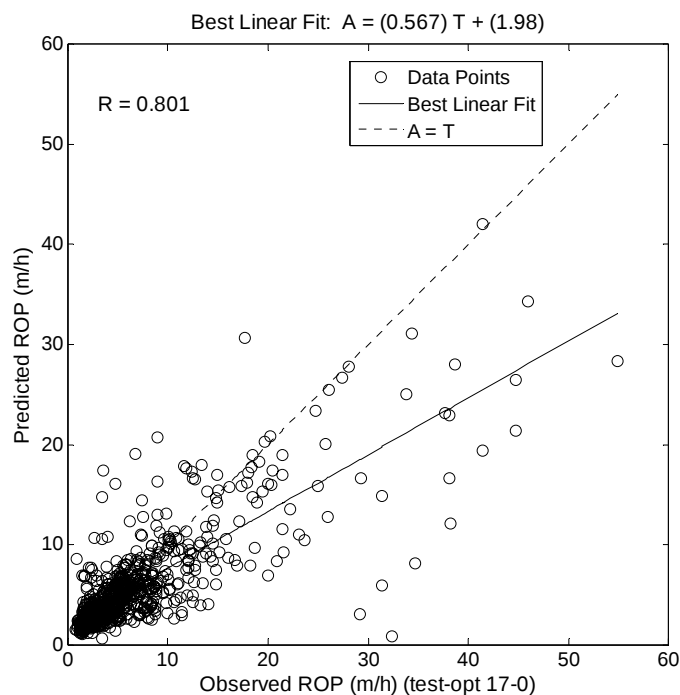
شکل ۵-۲۲- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی



شکل ۵-۲۳- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی



شکل ۵-۲۴- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آموزش در روش منظم‌سازی



شکل ۵-۲۵- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده‌های آزمون در روش منظم‌سازی

۵-۷- مدل سازی نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ

برای انجام مدل سازی در روش بورگوین-یانگ از داده هایی که برای آموزش در شبکه ی عصبی استفاده می گردد (۷۰٪ کل داده ها)، برای محاسبه ی ضرایب ثابت، a_j ها، استفاده می شود و از داده های مورد استفاده در آزمایش شبکه ی عصبی (۳۰٪ کل داده ها)، برای آزمایش مدل رگرسیون خطی استفاده می شود. برای انجام این کار، با توجه به مطالب گفته شده در فصل ۴، ابتدا می بایست متغیرهای حفاری یعنی x_j ها را محاسبه نمود. محاسبه x_j ها با استفاده از روابط مندرج در جدول ۴-۱ و داده های موجود برای سازندهای داریان و سورمه در چاه های مختلف امکان پذیر است. البته برای محاسبه نیروی اعمالی هیدرولیکی جت مته، F_j ، در پارامتر x_8 که مؤید اثر هیدرولیک مته است، از رابطه زیر استفاده می شود [Bourgoyne et al, 1991]:

$$F_j = 0.1823 C_d q \sqrt{\rho \Delta p_b} \quad (۱-۵)$$

و Δp_b از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\Delta p_b = \frac{8/311 \times 10^{-5} \rho q^2}{C_d^2 A_t^2} \quad (۲-۵)$$

که در روابط فوق، F_j : نیروی اعمالی هیدرولیکی (پوند)، Δp_b : افت فشار درون مته (پوند بر اینچ مربع)، q : شدت جریان گل (گالن در دقیقه)، ρ : وزن مخصوص گل (پوند بر گالن)، A_t : مساحت کلی نازل های مته (اینچ مربع) و C_d : ضریب تخلیه بوده و معمولاً برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته می شود. همچنین وزن مخصوص معادل گردش گل، ρ_c ، در پارامتر x_4 که تأثیر عدم تعادل فشار سازند و فشار گل در ته چاه را نشان می دهد، از رابطه زیر بدست می آید [Rabia, 1991]:

$$\rho_c \text{ (or ECD)} = \rho + \frac{\Delta p_a}{0.52 D} \quad (۳-۵)$$

که ρ_c : وزن مخصوص معادل گردش گل (پوند بر گالن)، ρ : وزن مخصوص گل (پوند بر گالن)، Δp_a : افت فشار در فضای حلقوی (پوند بر اینچ مربع) و D : عمق (فوت) است.

در مورد متغیر فرسودگی مته، x_7 ، اگر چه اطلاعات مربوط به رتبه بندی مته ها پس از فرسودگی و خروج از چاه در اختیار بود، ولی چون در این دو سازند غالباً از مته های مخروطی چرخشی دکمه دار

که نمایه ی فرسودگی دندان، a_v ، برای آنها صفر است استفاده شده بود، این متغیر از محاسبات حذف گردید و a_1 تا a_6 و a_8 در رگرسیون شرکت داده شدند. برای تعیین این ضرایب با استفاده از داده های آموزش، برنامه ای در نرم افزار MATLAB طراحی گردید. در این برنامه پس از محاسبه ی x_j ها، با توجه به دستگاه معادلات اشاره شده در فصل ۴، معادله ماتریسی زیر حاصل می شود:

$$\begin{bmatrix} \sum x_1^2 & \sum x_1 x_2 & \sum x_1 x_3 & \cdots & \sum x_1 x_8 \\ \sum x_2 x_1 & \sum x_2^2 & \sum x_2 x_3 & \cdots & \sum x_2 x_8 \\ \sum x_3 x_1 & \sum x_3 x_2 & \sum x_3^2 & \cdots & \sum x_3 x_8 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_8 x_1 & \sum x_8 x_2 & \sum x_8 x_3 & \cdots & \sum x_8^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_1 \ln \frac{dD}{dt} \\ \sum x_2 \ln \frac{dD}{dt} \\ \sum x_3 \ln \frac{dD}{dt} \\ \vdots \\ \sum x_8 \ln \frac{dD}{dt} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

این معادله را می توان به صورت ساده ی زیر نوشت:

$$XA = B \quad (5-5)$$

که برای محاسبه ی ماتریس ضرایب (a_j ها) داریم:

$$A = X^{-1} B \quad (\det X \neq 0) \quad (6-5)$$

در نرم افزار MATLAB به جای محاسبه ماتریس معکوس X و ضرب آن در ماتریس B از عملگری بنام backslash (/) استفاده می شود. لذا هفت ضریب a_1 تا a_6 و a_8 به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$A = X/B \quad (12-4)$$

با مشخص شدن ضرایب معادله ی رگرسیون بورگوین-یانگ، می توان به آسانی با جایگذاری آنها در معادله (معادله ی ماتریسی در برنامه)، نرخ نفوذ را برای داده های آموزش محاسبه کرد. همچنین می توان با محاسبه ی x_j ها برای داده های آزمون و جایگذاری در معادله، نرخ نفوذ را برای داده های آزمون محاسبه کرد. حال می توان این نرخ های نفوذ تخمینی را با نرخ های نفوذ اندازه گیری شده در جریان عملیات حفاری مقایسه کرد و میزان همبستگی آنها را مشخص نمود.

در جدول ۵-۴، ضرایب محاسبه شده در معادله ی رگرسیون بورگوین-یانگ برای فواصل ۱ متری سازند داریان نشان داده شده است. کلیه محاسبات انجام شده در روش رگرسیون خطی چند متغیره ی بورگوین-یانگ بر پایه ی واحدهای انگلیسی است یعنی نرخ نفوذ محاسبه شده بر حسب فوت در ساعت می باشد. برای مقایسه ی بهتر نتایج رگرسیون چند متغیره با نتایج شبکه ی عصبی، نرخ های نفوذ در روش رگرسیون چند متغیره بر حسب متر در ساعت آورده شده اند.

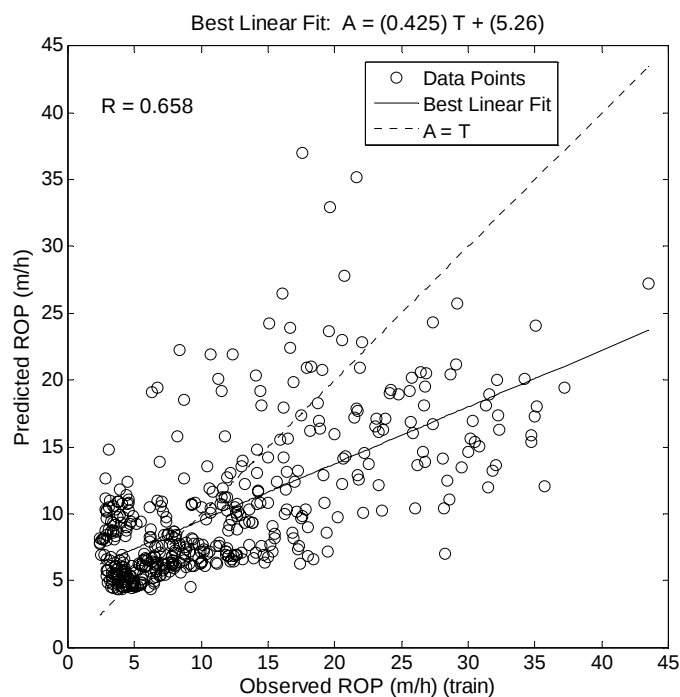
همان طور که در شکل های ۵-۲۶ و ۵-۲۷ دیده می شود ضریب همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای دو مجموعه داده های آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵۸ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش و آزمون در شکل های ۵-۳۰ و ۵-۳۱ به ترتیب برابر ۰/۴۰ و ۰/۳۹ می باشد. جذر میانگین مربعات خطا برای فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر با ۶/۴۶۰ و ۷/۰۲۴ است و برای فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۶/۰۶۷ و ۶/۶۱۷ می باشد. با توجه به ضریب همبستگی بسیار پایین و جذر میانگین مربعات خطای نسبتاً بالای بدست آمده توسط مدل بورگوین-یانگ، به نظر می رسد در استفاده از این مدل باید دقت بیشتری به عمل آورد. در شکل های ۵-۲۸ و ۵-۲۹ نیز مقایسه ی بین نرخ نفوذ شبکه با نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش و آزمون در مقابل تعداد داده های هر سری آورده شده است که نرخ نفوذ اندازه گیری شده با علامت ستاره و نرخ نفوذ پیش بینی شده به صورت منحنی نشان داده شده است.

در نهایت مقایسه بین نتایج حاصل از ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای روش های مختلف ارائه شده برای مدل سازی، در جدول ۵-۵ آمده است.

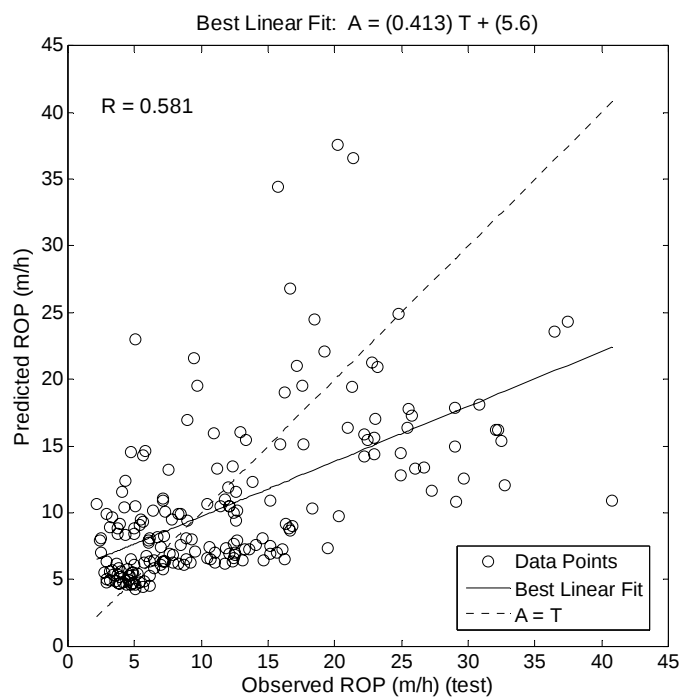
جدول ۵-۴- ضرایب محاسبه شده در معادله ی رگرسیون بورگوین-یانگ

برای فواصل ۱ متری سازند داریان

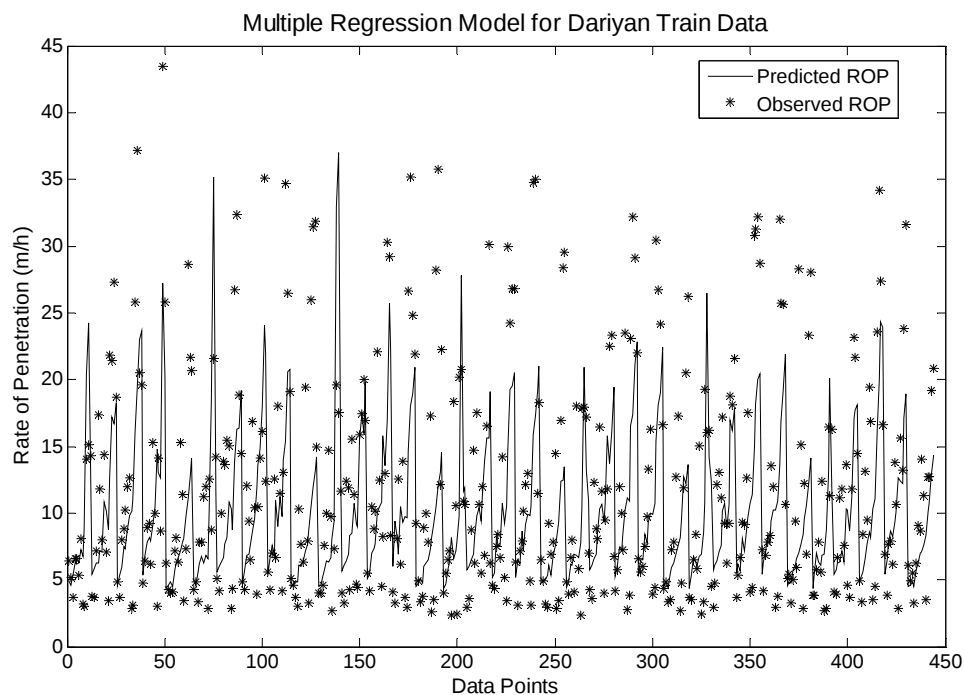
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
$6/56 \times 10^{-2}$	$-5/31 \times 10^{-2}$	۴/۳۷	$6/15 \times 10^{-6}$	$-4/25 \times 10^{-1}$	$1/78 \times 10^{-1}$	$2/28 \times 10^{-1}$



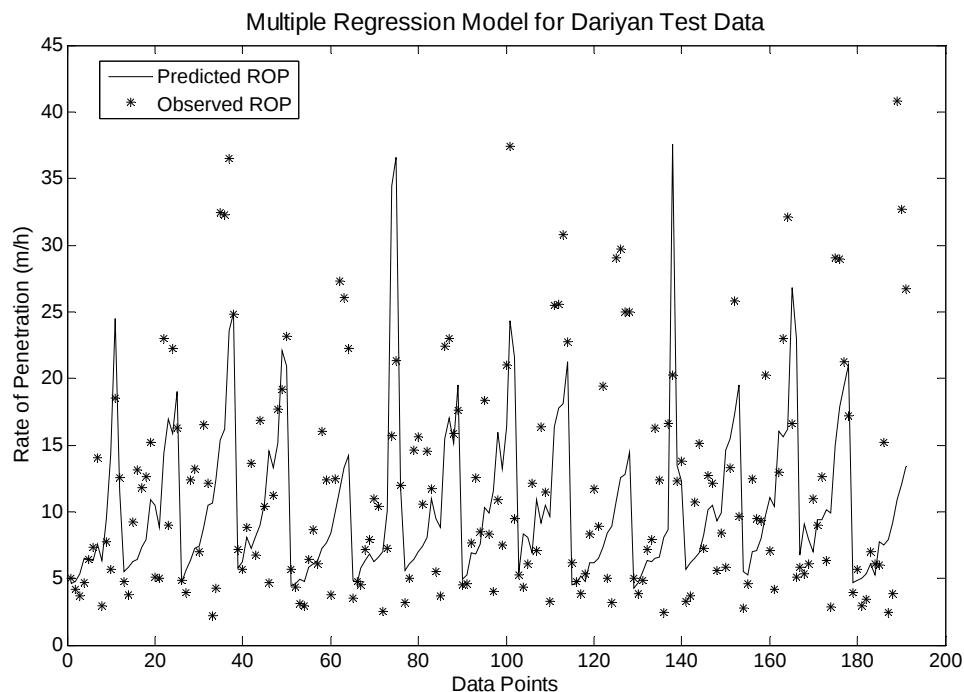
شکل ۵-۲۶- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آموزش در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



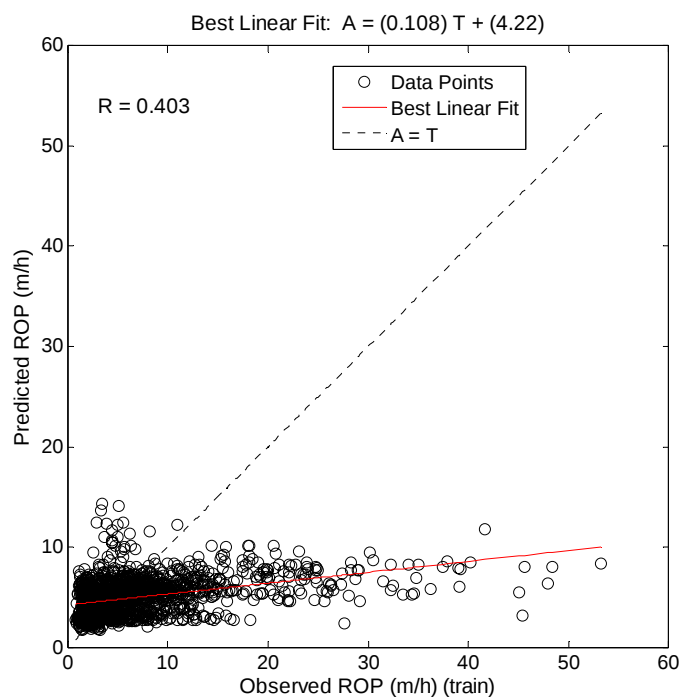
شکل ۵-۲۷- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده های آزمون در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



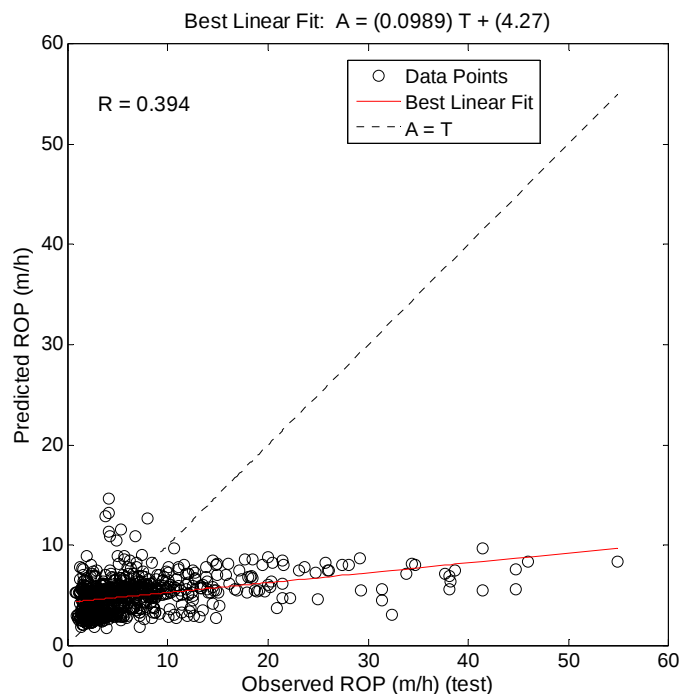
شکل ۵-۲۸- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آموزش در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



شکل ۵-۲۹- مقایسه بین نرخ نفوذ پیش‌بینی شده و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در فواصل ۱ متری سازند داریان برای داده‌های آزمون در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



شکل ۵-۳۰- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آموزش در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ



شکل ۵-۳۱- همبستگی بین نرخ نفوذ پیش بینی شده و نرخ نفوذ اندازه گیری شده در فواصل ۱ متری سازند سورمه برای داده های آزمون در روش رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ

جدول ۵-۵- مقایسه ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای روش های مختلف

در مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون

روش	سازند	فواصل عمقی (متر)	ساختار بهینه شبکه	ضریب همبستگی			جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)		
				آموزش	اعتبارسنجی	آزمون	آموزش	اعتبارسنجی	آزمون
شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع	داریان	۱	۱-۸-۱۲-۵	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۸	۳/۱۸۲	۴/۲۹۶	۴/۱۹۸
		۲	۱-۱۰-۱۹-۵	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۸۸	۳/۷۲۴	۵/۶۱۰	۴/۶۲۵
	سورمه	۱	۱-۱۳-۱۰-۵	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۸۱	۳/۶۵۹	۴/۶۳۳	۴/۱۵۴
		۲	۱-۱۶-۱۵-۵	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۸۷	۲/۶۸۴	۳/۶۴۹	۲/۹۷۱
		۳	۱-۱۷-۱۸-۵	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۹	۲/۳۲۳	۳/۱۱۹	۲/۹۰۳
شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش منظم سازی	داریان	۴	۱-۱۰-۵-۵	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۸۶	۲/۷۲۳	۳/۴۹۷	۳/۴۶۹
		۵	۱-۹-۸-۵	۰/۹۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۲/۱۳۷	۳/۵۲۰	۳/۶۹۸
	سورمه	۱	۱-۱۲-۵	۰/۹۲	—	۰/۸۸	۳/۳۳۲	—	۴/۰۰۵
		۲	۱-۱۰-۵	۰/۹۲	—	۰/۸۷	۳/۲۳۰	—	۴/۰۴۴
		۱	۱-۱۷-۵	۰/۸۴	—	۰/۸۰	۳/۵۱۷	—	۴/۲۶۰
رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ	داریان	۲	۱-۲۴-۵	۰/۸۸	—	۰/۸۱	۲/۸۰۱	—	۳/۹۶۴
		۳	۱-۱۵-۵	۰/۸۹	—	۰/۸۴	۲/۸۰۴	—	۳/۴۱۷
	سورمه	۴	۱-۳۰-۵	۰/۹۳	—	۰/۸۴	۲/۱۹۵	—	۳/۱۱۹
		۵	۱-۱۶-۵	۰/۹۴	—	۰/۸۳	۱/۹۶۶	—	۳/۲۰۸
		۱	—	۰/۶۶	—	۰/۵۸	۶/۴۶۰	—	۷/۰۲۴
	داریان	۲	—	۰/۶۸	—	۰/۶۶	۶/۰۴۸	—	۶/۲۴۱
		۱	—	۰/۴۰	—	۰/۳۹	۶/۰۶۷	—	۶/۶۱۷
	سورمه	۲	—	۰/۴۴	—	۰/۴۲	۵/۵۴۴	—	۶/۳۹۷
		۳	—	۰/۴۱	—	۰/۴۹	۵/۸۲۹	—	۵/۳۵۹
		۴	—	۰/۴۵	—	۰/۴۳	۵/۵۴۰	—	۵/۴۶۰
	داریان	۵	—	۰/۴۷	—	۰/۳۹	۵/۳۷۵	—	۵/۴۷۲

با توجه به نتایج حاصل از شبکه های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ، می توان به قابلیت بالای شبکه های عصبی نسبت به روش رگرسیون خطی چند متغیره در پیش بینی نرخ نفوذ پی برد. در روش های مختلف شبکه عصبی نیز با توجه به نتایج حاصل، روش توقف سریع با توجه به ارائه ضرایب همبستگی بالاتر در مراحل آموزش و سرعت همگرایی بیشتر، به روش منظم سازی در این مطالعه ترجیح داده می شود. در مورد پایین تر بودن مقادیر RMS در روش

توقف سریع نسبت به روش منظم سازی نمی توان به راحتی قضاوت کرد و بعضاً مواردی دیده می شود که مقدار RMS در روش منظم سازی از روش توقف سریع کمتر است. دلیل بروز این مسئله را جدا از تفاوت ماهیتی و محاسباتی موجود در این دو روش می توان به این صورت بیان کرد که در روش توقف سریع سه دسته داده ی آموزش، اعتبارسنجی و آزمون وجود دارد که هر کدام به ترتیب ۷۰، ۲۰ و ۱۰ درصد داده ها را به خود اختصاص می دهند و مقادیر ضریب همبستگی و RMS برای هر یک جدا محاسبه می شود، در روش منظم سازی این مقادیر ۷۰ و ۳۰ برای داده های آموزش و آزمون می باشد که ۳۰ درصد داده های آزمون در این روش از ترکیب داده های اعتبارسنجی و آزمون در روش توقف سریع شکل گرفته است و مقادیر ضریب همبستگی و RMS برای این ۳۰ درصد محاسبه می شود لذا مقادیر ضریب همبستگی در روش منظم سازی نسبت به روش توقف سریع گرچه در شرایط بهتری نیست ولی وقتی RMS برای آن محاسبه می شود مقادیر بهتری (کمتری) را نتیجه می دهد.



فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات



نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

به حداقل رساندن هزینه‌های حفاری چاه‌های نفت و گاز یکی از مهمترین اهدافی است که در جریان عملیات حفاری دنبال می‌شود. بنابراین بیشترین تمرکز و تلاش در راه افزایش هر چه بیشتر راندمان حفاری و تنظیم مجموعه‌ی عوامل تأثیرگذار بر آن است. یافتن رابطه‌ی بین نرخ نفوذ و پارامترهای مؤثر بر آن در همین راستا صورت می‌پذیرد و مدل‌هایی که بتوانند به شکلی دقیق‌تر و جامع‌تر این رابطه را بیان کنند، در الویت قرار می‌گیرند.

اطمینان از کیفیت داده‌های در دسترس، تا حدود زیادی موفقیت روش‌های مدل‌سازی را تضمین می‌کند. این مطلب در مورد بعضی از پارامترهای مدل بورگوین-یانگ همچون فرسودگی مته و دندانه‌های آن وجود نداشت، لذا این پارامتر از جریان مدل‌سازی با هر دو روش حذف گردید. هر یک از پارامترهای موجود در مدل بورگوین-یانگ دارای روابط خاص خود می‌باشند. بعضاً نیاز است متغیرهای موجود در آن‌ها را نیز از طریق روابط دیگر محاسبه کرد. این مسئله، آماده‌سازی داده‌ها در مدل بورگوین-یانگ را مشکل و زمان‌بر می‌کند. در حالی که در شبکه‌ی عصبی امکان استفاده‌ی مستقیم از خود پارامتر نظیر وزن مخصوص گل وجود دارد.

روش شبکه عصبی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ، دارای مزایای بیشتری نسبت به روش رگرسیون خطی چند متغیره است، زیرا در روش شبکه عصبی دانستن مدل ریاضی و فرض خطی بودن مسئله ضروری نمی‌باشد. مهم‌ترین مساله در این روش، انتخاب مناسب الگوهای آموزشی، آماده‌سازی داده‌ها و تنظیم پارامترهای شبکه است.

برای مدل‌سازی شبکه پس انتشار خطا در این مطالعه از دو روش توقف سریع و منظم‌سازی استفاده گردید. در روش توقف سریع چون آموزش بر اساس داده‌های اعتبارسنجی انجام می‌گیرد،

سریعتر به جواب می‌رسد، فقط مسئله تنظیم پارامترهای شبکه از جمله انتخاب تعداد لایه‌های میانی و تعداد نرون‌های آنها است. در این مطالعه برای انجام این کار از الگوریتم تعیین ساختار شبکه استفاده شد. در الگوریتم مذکور یافتن شبکه‌ای که در آن خطای داده‌های آزمون حداقل باشد، پایه و اساس کار را تشکیل می‌دهد. نتیجه‌ی مدل‌سازی نرخ نفوذ با روش توقف سریع و الگوریتم لونبرگ - مارکوآرت برای فواصل ۱ متری سازندهای داریان و سورمه، شبکه‌هایی با ساختارهای به ترتیب ۵-۱۲-۸ و ۵-۱۳-۱۰ با توابع محرک تانژانت هایپربولیک در لایه‌های پنهان و خطی در لایه‌ی خروجی است.

در روش منظم‌سازی، آموزش با توجه به مجموع مربعات خطا، وزنها و تابع ارزیابی اصلاح شده (MSEREG)، انجام می‌گیرد. در این مطالعه از روش منظم‌سازی اتوماتیک بیزین برای طراحی شبکه استفاده گردید. با افزایش تعداد لایه‌های میانی و نرون‌ها، زمان همگرایی شبکه طولانی می‌گردد در نتیجه شبکه‌ای با یک لایه پنهان و تعداد کافی نرون در آن از قابلیت تعمیم مناسبی برخوردار خواهد بود. در این روش نیز الگوریتم تعیین ساختار شبکه برای تعیین تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان استفاده شد. نتیجه‌ی مدل‌سازی نرخ نفوذ با روش منظم‌سازی برای فواصل ۱ متری سازندهای داریان و سورمه، شبکه‌هایی با ساختار به ترتیب ۵-۱۲-۱ و ۵-۱۷-۱ است.

با توجه به نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره بورگوین-یانگ در جدول ۵-۵، می‌توان به قابلیت بالای شبکه‌های عصبی نسبت به روش رگرسیون خطی چند متغیره در پیش‌بینی نرخ نفوذ پی برد. لذا این شبکه‌ها می‌توانند جانشین مناسبی برای مدل‌های خطی و غیرخطی معمول باشند. در روش‌های مختلف شبکه عصبی نیز با توجه به نتایج حاصل، روش توقف سریع با توجه به ارائه ضرایب همبستگی بالاتر و سرعت همگرایی بیشتر، به روش منظم‌سازی در این مطالعه ترجیح داده می‌شود.

با نظری بر نتایج حاصل برای دو سازند داریان و سورمه می‌توان گفت نرخ نفوذ پیش‌بینی شده برای سازند داریان در همه‌ی روش‌های انجام گرفته بهتر از سازند سورمه است. دلیل این مسئله را می‌توان در همگن‌تر بودن سازند داریان نسبت به سازند سورمه دید. سازند سورمه در چاه‌های مختلف

از زیرسازند^۱های کوچک‌تری تشکیل شده که این زیرسازندها می‌توانند زمینه‌ساز این نتایج علی‌الخصوص در مدل بورگوین-یانگ باشند. همچنین تعداد مته‌های به کار رفته در حفاری سازند سورمه بسیار زیاد است. حال آن که سازند داریان در اغلب چاه‌ها با یک مته و بعضاً با دو مته حفاری شده است.

در مورد ترکیب‌بندی فواصل عمقی مختلف، نتایج مورد انتظار مبنی بر پیش‌بینی بهتر نرخ نفوذ با افزایش طول بازه‌ی ترکیب، محقق نشد. تنها در مورد روش بورگوین-یانگ این طور به نظر می‌رسد که در بعضی موارد نتایج با افزایش طول بازه در حال بهبود است ولی نمی‌توان قطعاً به آن استناد کرد. دلیل دیگر بروز نتایج غیر قابل قبول برای مدل بورگوین-یانگ کالیبره نبودن این مدل در شرایط میدان‌های نفتی ایران است.

۲-۶- پیشنهادات

در صورتی که اطلاعات کامل پارامترهای حفاری و اطلاعات مربوط به هزینه‌های حفاری در اختیار باشد، می‌توان از معادلات مربوط به محاسبه‌ی پارامترهای بهینه که در انتهای فصل ۴ به آنها اشاره شده استفاده کرد.

بدست آوردن بهترین مدل شبکه عصبی برای یک منطقه، پایان کار نیست بلکه باید عملیات بهینه‌سازی با هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها و یافتن پارامترهای بهینه انجام گیرد. به نظر می‌رسد بتوان از روش‌های تحقیق در عملیات برای نیل به این هدف استفاده کرد.

بورگوین و یانگ مدل حفاری پیشنهادی خود را با توجه به شرایط حفاری در سواحل لوئیزیانا کالیبره کرده‌اند. برای استفاده از این مدل در میداین هیدرکربوری ایران بهتر است آن را با توجه به جمیع شرایط زمین‌شناختی و تکنولوژیکی موجود در ایران کالیبره کرد.

مدل حفاری بورگوین- یانگ برای مته‌های مخروط چرخشی ارائه شده است، در حالی که شبکه‌های عصبی مصنوعی از این لحاظ محدودیتی ندارند. لذا می‌توان از آن‌ها برای مدل‌سازی سازندهای حفاری شده با مته‌های الماسی و PCD استفاده کرد.

برخی عوامل مؤثر در حفاری همچون گشتاور پیچشی که اثر آن در مدل بورگوین و یانگ منظور نگردیده، حاوی اطلاعات ارزشمندی از پارامترهای سازند و نحوه کار مته هستند. بهتر است نتیجه‌ی حضور این پارامتر در مدل‌سازی با شبکه عصبی بررسی شود.

تلفیق نمودن منطق فازی و شبکه عصبی برای مدل کردن فرآیند حفاری و عوامل مؤثر در آن، و همچنین استفاده از سایر روش‌های شبکه‌ی عصبی می‌تواند موضوع مناسبی برای تحقیق باشد.

داده‌های حاصل از پایش عملیات حفاری از نظر تئوری می‌تواند حاوی اطلاعاتی در مورد خصوصیات سازند تحت حفاری یا سنگ مخزن از قبیل فشار منفذی، تخلخل و نفوذپذیری باشد. می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی در جهت اثبات یا عدم اثبات این مطلب گام برداشت.

منابع

البرزی، م.، ۱۳۸۰. "آشنایی با شبکه‌های عصبی مصنوعی". مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

بخشی، ا.، ۱۳۸۲. "شبیه سازی نمودار شاخص فتوالکتریک با شبکه های عصبی مصنوعی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک.

بدری، ج.، ۱۳۸۴. "مدل سازی نگاره‌های شاخص فتو الکتریک و زمان گذر صوت به کمک روش‌های عصبی- فازی در چاههای نفت". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک.

تدینی، م.، ربانی، ا.ر. و بیدهندی، م.، ۱۳۸۳. "تعیین نفوذپذیری سنگ مخزن میدان پارسی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی". کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۹۶۵-۱۹۷۸.

جلالی لیچائی، م.، بیدهندی، م. و میرزائی، س.، ۱۳۸۳. "تخمین تخلخل و نفوذپذیری میدان نفتی گچساران با استفاده از تکنیک شبکه عصبی". کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۹۷۹-۱۹۹۴.

حبیبیان، ب.، بیدهندی، م. و کاظم زاده، ع.، ۱۳۸۴. "پیش‌بینی نفوذپذیری از روی داده‌های چاه‌نگاری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران". مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۱، شماره ۱، ص ۷۹-۸۶.

حسنی پاک، ع.ا. و شرف الدین، م.، ۱۳۸۰. "تحلیل داده‌های اکتشافی". مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

خاکبازان، ا.ح.، فتحیان پور، ن.، و باقری، ع.م.، ۱۳۸۳. "تخمین نمودارهای خام چاه‌نگاری با استفاده از روش شبکه عصبی در چاه‌های قدیمی نفت". کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۲۰۱۵-۲۰۲۹.

دولتی، ف.، "جزوه‌ی درس حفاری". دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک.

رحیمی، م.، ۱۳۸۱. "تعبیر و تفسیر لرزه‌ای ناحیه پارس جنوبی در افق‌های آسماری، جهرم، سروک، داریان، فهلین، سورمه، کنگان، نار و فراقون". مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران.

روکی، ر.، ۱۳۸۶. "تخمین نفوذپذیری از روی نگارهای چاه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در یکی از میادین نفتی خلیج فارس". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک.

ریاضی، م.ر.، ۱۳۸۰. "آشنایی با مهندسی مخازن نفت و گاز". انتشارات دانشگاه صنعتی شریف.

طهماسبی، ف.، ۱۳۸۳. "مدل‌سازی معکوس دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک.

غضنفری، م. و ارکات، ج.، ۱۳۸۳. "شبکه‌های عصبی (اصول و کارکردها)". مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

مرادزاده، ع. و بخشی، ا.، ۱۳۸۵. "شبیه سازی نگار فوتوالکتریک سازندهای نفتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی". مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۳، ص ۱-۲۰.

مرادزاده، ع. و قوامی ریابی، ر.، ۱۳۸۰. "چاه‌پیمایی برای مهندسین". انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

منهاج، م.ب.، ۱۳۷۹. "مبانی شبکه های عصبی (جلد اول و دوم)". مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Adams, N., 1985. "Drilling Engineering". PennWell Publishing Company.

-
- Ali, M. and Chawathe, A., 1999. "Using Artificial Intelligence to Predict Permeability from Petrographic Data". Computers & Geosciences, Vol. 26, P. 915-925.
- Al-Kaabi, A. and Lee, W. J., 1993. "Using Artificial Neural Nets to Identify the Well Test Interpretation Model". SPE Formation Evaluation, P. 233-240.
- Al-Qahtane, F.A., 2000. "Porosity Distribution Prediction Using Artificial Neural Network". M.Sc. Thesis, Morganton Virginia University.
- Balan, B., Mohaghegh, S. and Ameri, S., 1995. "State-Of-The-Art in Permeability Determination from Well Log Data, Part 1: A Comparative Study, Model Development". Paper No. SPE 30978, SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Morgantown, West Virginia University.
- Balan, B., Mohaghegh, S., and Ameri, S., 1995. "State-Of-The-Art in Permeability Determination from Well Log Data, Part 2 :Verifiable, Accurate Permeability Predictions, the Touch-Stone of All Models" SPE Paper No. 30979, West Virginia University.
- Berry, M.J.A. and Linoff, G., 1997. "Data Mining Techniques". John Willy & Sons Publishing, Vol. 1, P. 454.
- Bhatt, A., 2002. "Reservoir Properties from Well Logs Using Neural Networks". A dissertation for the partial fulfillment of requirements for the degree of PhD at the Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology.
- Bilgesu H.I., Altmis U., Ameri S., Mohaghegh, S. and Aminian K., 1998. "A New Approach to Predict Bit Life Based on Tooth or Bearing Failures". SPE Paper No. 51082, SPE Eastern Regional Technical Conference, Pittsburg, PA, October 9-11.

- Bilgesu, H.I., Tetrick, L.T., Altmis, U., Mohaghegh, S. and Ameri, S., 1997. "A New Approach for the Prediction of Rate of Penetration (ROP) Values". SPE Paper No. 39231, SPE Eastern Regional Technical Conference, Lexington, KY, October 22-24.
- Bishop, C., 1995. "Neural Networks for Pattern Recognition", Oxford University Press.
- Bourgoyne, A.T. Jr. and Young, F.S. Jr., 1974. "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection". Journal of Society of Petroleum Engineering, Vol. 257, P. 371-384.
- Bourgoyne, A.T. Jr., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. and Young, F.S. Jr., 1991. "Applied Drilling Engineering". Society of Petroleum Engineering.
- Chen, C., and Lin, Z., 2005. "A Committee Machine with Empirical Formulas for Permeability Prediction", Elsevier Science Publications, Vol. 32, P. 485-496.
- Demuth, H. and Beale, M., 2002. "Neural Network Toolbox for Use with MATLAB", User's Guide Version 4.
- Devereux, S., 1999. "Drilling Technology in Nontechnical Language". PennWell Publishing Company.
- Doraisamy, H., Ertekin, T., and Grader, A., 1998. "Key Parameters Controlling the Performance of Neuro Simulation Applications in Field Development". SPE Paper No. 51079, SPE Eastern Regional Conference, Pittsburgh, PA, P. 233-241.
- Grima, M.A., 2000. "Neuro-Fuzzy Modeling in Engineering Geology". A.A.Balkema Publishers.

- Hampson, D.P., Schuelke, J.S. and Quirein, J.A., 2001. "Use of Multiattribute Transforms to Predict Log Properties from Seismic Data". *Geophysics*, Vol. 66(1), P. 220-236.
- Haykin, S., 1999. "Neural Network: A Comprehensive Foundation". Prentice Hall, P. 842.
- Hecht-Nielsen, R., 1987. "Kolmogorov's Mapping and Neural Network Existence Theorem". 1st International on Neural Networks, IEEE, Vol. 1, P. 641-648.
- Huang, Z. and Williamson, M.A., 1997. "Determination of Porosity and Permeability in Reservoir Intervals by Artificial Neural Network Modeling Offshore Eastern Canada". *Petroleum Geoscience*, Vol. 3, P. 245-258.
- Jones E.R., 2004. "An Introduction to Neural Networks (A White Paper)". Visual Numerics, Inc., (www.visualnumerics.com).
- Juniardi, I.J. and Ershaghi, I., 1993. "Complexities of Using Neural Networks In Well Test Analysis of Faulted Reservoir". SPE Paper No. 26106, SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska.
- Karanam U.M.R. and Misra B., 1998. "Principles of Rock Drilling". A.A. Balkema.
- Lim, J., 2005. "Reservoir Properties Determination Using Fuzzy Logic and Neural Networks from Well Data in Offshore Korea". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier Science Publications, Vol. 49, P. 182-192.
- Mohaghegh, S., 2000. "Virtual Intelligence Applications in Petroleum Engineering: Part I - Artificial neural networks". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, P. 40-46.

- Mohaghegh, S., Arefi, R., Ameri, S., and Rose, D., 1995. "Design and Development of An Artificial Neural Network for Estimation of Formation Permeability". SPE Paper No. 28237, SPE Computer Conference, Dallas, Texas, P. 151-154.
- Mohaghegh, S., Arefi, R., and Ameri S., 1996. "Reservoir Characterization with the Aid of Artificial Neural Networks". Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 16, P. 263-274, Elsevier Science Publications, Amsterdam, Holland.
- Mohaghegh, S., Popa, A., and Koperna, G., 1999. "Reducing the Cost of Field-Scale Log Analysis Using Virtual Intelligence Techniques", SPE Paper No. 57454, SPE Eastern Regional Conference, Charleston, WV.
- Mohaghegh, S., Richardson, M., and Ameri, S., 1998. "Virtual Magnetic Imaging Logs: Generation of Synthetic MRI Logs from Conventional Well Logs". SPE Paper No. 51075, SPE Eastern Regional Conference, Pittsburgh, PA.
- Moore, Preston L., 1986. "Drilling Practices Manual". PennWell Publishing Company.
- Neural Network Toolbox User's Guide of MATLAB, 2002. MathWorks, Inc.
- Nguyen, J.-P., 1996. "Oil and Gas Field Development Techniques Drilling". Editions Technip.
- Nikraves, M., Kovscek, A. R., Jonston, R. M. and Patsek, T. W., 1996. "Prediction of Formation Damage During the Fluid Injection into Fractured Low Permeability Reservoirs via Neural Networks". SPE Paper No. 31103, SPE Formation Damage Symposium, Lafayette, LA.
- Ouense, A., Zellou, A., Basinski, P. M. and Head, C. F., 1998. "Practical Use of Neural Networks in Tight Gas Fractured Reservoirs: Application to the San Juan Basin".

-
- SPE Paper No. 39965, Rocky Mountain Regional Meeting / Low Permeability Reservoir Symposium, Denver, CO.
- Poulton, M.M., 2001, "Computational Neural Networks for Geophysical Data Processing (Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration)". Pergamon Publisher.
- Poulton, M.M., 2002, "Neural Networks as An Intelligence Amplification Tool: A Review of Applications". Geophysics, Vol. 67(3), P. 979-993.
- Poulton, M.M., Sternberg, B.K. and Glass, C.E., 1992. "Neural Network Pattern Recognition of Subsurface EM Images". Journal of Applied Geophysics, Vol. 29, P. 21-36.
- Principe, J.C., Euliano, N. and Lefebvre, W., 2000. "Neural and Adaptive Systems: Fundamentals through Simulations". John Wiley & Sons, Inc.
- Rabia, H., 1991. "Oilwell Drilling Engineering: Principles and Practice". Graham & Trotman Kluwer Academic Publishers Group.
- Rolon, L., 2004, "Developing Intelligent Synthetic Logs: Application to Upper Devonian Units in PA". M.Sc thesis, Morgantown, West Virginia University.
- Singer, D.A. and Kouda, R., 1996. "Application of a Feed-forward Neural Network in the Search for Kuroko Deposits in Hokuroku District, Japan". Mathematical Geology, Vol. 28(8), P. 1017-1023.
- Sung, W., Hanyang, U. and Yoo, I., 1995, "Development of HT-BP Neural Network System for the Identification of Well Test Interpretation Model". SPE Paper No. 30974, SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Morgantown, West Virginia.

Ternyik, J., Bilgesu, H.I., and Mohaghegh, S., 1995, "Virtual Measurement in Pipes, Part 2: Liquid Holdup and Flow Pattern Correlation," SPE Paper No. 30976, SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Morgantown, West Virginia.

Ternyik, J., Bilgesu, H.I., Mohaghegh, S. and Rose, D., 1995, "Virtual Measurement in Pipes, Part 1: Flowing Bottomhole Pressure Under Multi-phase Flow and Inclined Wellbore Conditions," SPE Paper No. 30975, SPE Eastern Regional Conference and Exhibition, Morgantown, West Virginia.

www.bakerhughes.com/

www.ii.metu.edu.tr/

www.intelligentsolutionsinc.com/SPE.htm/

www.reedhycalog.com/

www.slb.com/

www.tpub.com/

www.visualnumerics.com/company/whitepapers/

Yilmaz S., Demircioglu C. and Akin S., 2002. "Application of Artificial Neural Networks to Optimum Bit Selection". Journal of Computers & Geosciences, Vol. 28, P. 261-269.

Zaknich, A., 2003. "Neural Networks for Intelligent Signal Processing". World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Zellou, A., Ouense, A. and Banik, A., 1995. "Improved Fractured Reservoir Characterization Using Neural Networks, Geomechanics and 3-D Seismic". SPE Paper No. 30722, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX.



Shahrood University of Technology
School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Modeling of Oil and Gas Wells Drilling Efficiency Using Artificial Neural Networks and Bourgoyne-Young's Multiple Regression Approach

**A Thesis Submitted
In Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Science
In
Mining Exploration Engineering**

**By:
Ehsan A.Yarmohammadi**

**Supervisor:
Dr. Ali Moradzadeh**

**Consultants:
Dr. Reza Shadizadeh
Mehdi Zaferanieh**

May 2008