

نشریه علمی-تخصصی

پژوهش‌های نفت مهندسی

ماهنامه علمی-تخصصی پژوهش‌های نوین علوم مهندسی
سال دوم، دی‌ماه ۱۳۹۶، شماره ۱۲

روش‌های رایج مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت

سحر امیری

استفاده از سورفکتانت آنیونی با هدف افزایش بازیافت نفت

برای مخازن نفت معمولی با استفاده از سیلاب زنی

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده

شناسایی عوامل کلیدی و بررسی دقت پیش بینی مدل‌های داده

کاوی در تصادفات ترافیکی محور زنجان-تبریز

بهزاد مسلم، فرزاد موحدی سبحانی، عباس سقایی

تحلیل عددی مکانیسم شکست سنگ‌های دارای لایه‌بندی با

زوایای مختلف تحت فشار تک‌محوره

حسن سرفراز، عباس مجدی

NRES.ir

پژوهش‌های نوین علوم مهندسی

ماهنامه علمی-تخصصی پژوهش‌های نوین علوم مهندسی،
سال دوم، شماره دوازدهم، دی‌ماه ۱۳۹۶

صاحب‌امتیاز و مدیرمسئول:
امیرحسین یوسفی
سرمدبیر: میلاد فتاحی
مدیر داخلی: منیژه ملائی

اعضای شورای علمی نشریه:

جناب آقای دکتر محمدعلی ارجمند، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
جناب آقای دکتر شهروز اسدی، دانشگاه شهید بهشتی
جناب آقای دکتر رضا افضل، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر علی جباری، دانشگاه اراک
سرکارخانم دکتر ساغر جارچی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر چنگیز دهقانیا، دانشگاه تهران
جناب آقای دکتر نعمت حسینی، دانشگاه شهید بهشتی
سرکارخانم دکتر راحله خادمیان، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر علی رحمانی، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
سرکارخانم دکتر فائزه رحمانی، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر قدرت الله رودینی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محبعلی رهدار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر مرتضی زیودار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محمدحسین کاظمی، دانشگاه شاهد
جناب آقای دکتر علی فروغی، دانشگاه تبریز
جناب آقای دکتر علی لکی روحانی، دانشگاه زنجان
جناب آقای دکتر سیدحمید هاشمی، دانشگاه اراک

۰۲۱ ۳۳ ۲۰ ۲۴ ۸۷



۰۲۶ ۳۲ ۷۲ ۴۷۸۷



۰۲۱ ۴۳ ۸۵ ۷۱ ۲۴

۰۲۶ ۳۲ ۷۴ ۷۱ ۵۸

تهران: افسریه ۱۵ متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج: چهارراه هفت‌تیر، خیابان لاله ۱، پلاک ۱۴، طبقه همکف

فراخوان پذیرش مقاله

توسعه پرشتاب و گسترده علوم به ویژه در حوزه فنی و مهندسی، انجام اقدامات علمی برای معرفی دستاوردهای علمی را بیش از پیش ضروری کرده است. توسعه پایدار ایران اسلامی، مستلزم ایجاد زیرساخت‌های علمی به ویژه در حوزه علوم مهندسی است. موسسه مدیریت دانش شباک با همکاری اساتید برجسته دانشگاهی با هدف معرفی پژوهش‌های علوم مهندسی و ایجاد فرصتی برای تبادل مطالعات و تجارب در این حوزه، نشریه پژوهش‌های نوین علوم مهندسی را منتشر می‌کند.

تحریریه به منظور انتشار گسترده پژوهش‌های روزآمد از اساتید، صاحب‌نظران، مهندسان، دانشجویان، کارشناسان، پژوهشگران و علاقه‌مندان علوم مهندسی، دعوت می‌کند تا با ارائه مقالات علمی ارزشمند خود، از طریق وبسایت نشریه به نشانی www.nres.ir ضمن مشارکت فعال به غنای این نشریه کمک نمایند. برای ارسال مقاله به نشریه کافی است تا در وبسایت نشریه ثبت‌نام نموده و با ورود به پنل کاربری، مقاله خود را ثبت کنید. پس از بررسی اولیه و داوری علمی از طرف تحریریه جهت انتشار مقاله با نویسنده مسئول تماس گرفته می‌شود.

موضوعات نشریه پژوهش نوین علوم مهندسی:

- مهندسی صنایع
- مهندسی عمران
- مهندسی مکانیک
- مهندسی معدن
- مهندسی هوا فضا
- مهندسی مواد و متالورژی
- مهندسی برق و الکترونیک
- مهندسی انرژی و فیزیک
- مهندسی شیمی، نفت و پلیمر
- مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
- مبانی علوم مهندسی
- مدیریت دانش در علوم مهندسی

فهرست مقالات

صفحه	عنوان مقاله
۱	روش های رایج مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت سحر امیری
۱۱	استفاده از سورفکتانت آنیونی با هدف افزایش بازیافت نفت برای مخازن نفت معمولی با استفاده از سیلاب زنی ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده
۲۱	شناسایی عوامل کلیدی و بررسی دقت پیش بینی مدل های داده کاوی در تصادفات ترافیکی محور زنجان-تبریز بهزاد مسلم، فرزاد موحدی سبحانی، عباس سقایی
۴۵	تحلیل عددی مکانیسم شکست سنگ های دارای لایه بندی با زوایای مختلف تحت فشار تک محوره حسن سرفراز، عباس مجدی

روش های رایج مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت

سحر امیری

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، استادیار گروه مهندسی پلیمر

s.amiri@srbiau.ac.ir

چکیده

از آنجایی که اکثر روش های متداول استخراج نفت خام، تنها قادرند حدود ۲۰ درصد از کل ذخیره نفتی چاه را استحصال کنند، بنابراین استخراج بیش از ۸۰ درصد محتوای مخازن نفت خام که در کنار چاه اصلی و در درون سنگ های متخلخل اطراف آن قرار دارد بسیار مهم و اقتصادی است. روش های متنوعی به منظور افزایش بازیافت نفت استفاده شده است مانند فرآیندهای استخراج حلالی یا تزریق امتزاجی، تزریق نیتروژن و گاز دودکش، تزریق امتزاجی گازهای هیدروکربوری و سیلاب زنی با گاز دی اکسید کربن؛ فرآیندهای کاهش کشش سطحی و فرآیندهای تغییر گرانروی به منظور کاهش گرانروی نفت و افزایش گرانروی سیال جابه جا کننده - تزریق بخار یا گاز برای ارتقای بازدهی مکانیزم، ریزش ثقلی، بیوسورفکتانت ها و احتراق زیرزمینی. اما نکته مهم در مورد این روش ها قیمت بالا، پایین بودن درصد بازیابی، ویسکوزیته پایین پلیمرهای مورد استفاده و ضایعات بالا می باشد. متوسط ضریب بازیافت جهانی از مخازن هیدروکربنی در حدود ۳۰ درصد است، بنابراین توسعه روشهای جدید به منظور افزایش بازیافت نفت به منظور افزایش تولید نفت و برقراری تعادل بین عرضه و تقاضا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله به روش های رایج مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت اشاره می شود.

واژگان کلیدی: روش های ازدیاد برداشت نفت، تزریق گاز، مخازن شکافدار، تزریق گاز، تزریق آب، تزریق متناوب آب و گاز، روش حرارتی.

۱-مقدمه ای بر ازدیاد برداشت نفت

افزایش طول عمر مخازن نفتی، همواره از نگرانی های کشورهای دارنده نفت به شمار میرود که سالانه مبالغ زیادی صرف پروژه های تحقیقاتی بر روی روشهای ازدیاد برداشت از مخازن نفتی میشود و همواره کشورهای دارای مخازن نفتی سعی دارند تا با ارائه مناسب ترین روش از منابع خود هر چه بیشتر بهره مند شوند. از نکات قابل توجه در مدیریت مخازن استفاده صحیح از منابع نفتی کشور و اتخاذ روش هایی برای حفظ و صیانت مخزن، بالابردن راندمان تولید و نگه داشتن آن در حد مطلوب در طول زمان می باشد (Mohanty, 2003) (Reynolds, 2002) (Deffeyes, 2008).

ازدیاد برداشت نفت به طور جدی بر قیمت نفت و اقتصاد گره خورده است. در چند سال اخیر، شناسایی و استفاده از روش های جدید افزایش بازیافت نفت با کارایی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. طبق گزارشات در صورتی که بتوان یک درصد افزایش برداشت از میدان ها را محقق کرد، افزایش برداشت به ۶ میلیارد بشکه می رسد که بسیار مورد توجه است. افزایش ذخایر قابل استحصال نفت خام از طریق اجرای طرح های افزایش ضریب بازیافت، یک روش کارآمد تزايد ثروت های ملی از دارایی های موجود (یعنی همان میدان های هیدروکربوری فعال و در حال تولید) است؛ آن هم در حالی که سرمایه گذاری های هنگفتی برای اکتشاف ذخایر جدید نفت خام در نقاط دور دست و صعب العبور کشور انجام نشده است. مخازن نفتی ایران دارای ساختاری متفاوت نسبت به مخازن نفتی دنیا میباشد به طوری که اکثر این مخازن ساختاری کربناته داشته و تنها ۱۰ درصد از آنها دارای ساختار شنی هستند از طرفی، بخش نسبتاً بزرگی از نفت موجود در این مخازن، سنگین بوده و به آسانی قابل استحصال نیست. ضریب بازیافت نفت برای اکثر مخازن هیدروکربوری ایران در حدود ۲۴ درصد گزارش شده است که این مقدار بسیار کمتر از ضریب

بازیافت متداول نفت در جهان می باشد. از این رو می توان گفت که در مخازن ایران، میزان نفت باقی مانده در یک مخزن هیدروکربوری نسبت به مقدار برداشت شده از آن بسیار زیاد است. حدود ۹۰ درصد از مخازن ایران از نوع شکافدار هستند و استخراج ثانویه از این مخازن کمتر از ۳۰ درصد است (Farouq-Ali, 2003) (Hirsch, 2005) (Mohanty, 2003). مخازن شکافدار عمدتاً مربوط به خشکی است و برخی از مخازن دریایی مانند جزیره سیری، مخازن شنی هستند. برداشت نفت در طول عمر یک مخزن به سه دسته برداشت اولیه، برداشت ثانویه و برداشت ثالثیه تقسیم می شود. برداشت ثالثیه خود به ۴ روش کلی شامل حرارتی، شیمیایی، تزریق امتزاجی گاز و کنترل تحرک تقسیم می شود (Reynolds, 2002) (Deffeyes, 2008) (Mohanty, 2003). نیروی حاصل از فشار گاز حل شده در نفت، نیروی حاصل از فشار گاز جمع شده در قسمت بالای کلاهک، فشار هیدرواستاتیک سفره آب مخزن در زیر ستون نفت و نیروی ریزش ثقلی در ستون بسیار مرتفع نفت، نیروهای موجود در مخازن نفت هستند. با توجه به وضعیت ساختمانی و زمین شناسی سنگ مخزن و خواص فیزیکی و ترمودینامیکی سیال های موجود در مخزن سهم مشارکت هر یک از این نیروها در رانش نفت متفاوت است. در مقابل این نیروها، نیروهای مخالفی سبب محبوس نگه داشتن یا ایجاد تنگنا در بازیابی نفت می شوند که مهمترین این نیروها، نیروی فشار موئینگی سنگ مخزن و نیروی اصطکاک حاصل از حرکت سیال در درون خلل و فرج سنگ مخزن تا ته چاه است. برای استحصال و بازیافت کامل نفت، باید چنان نیرویی در اعماق مخزن وجود داشته باشد که بتواند علاوه بر غلبه بر نیروهای مخالف، موجب رانش نفت به سمت بالا گردد (Farouq-Ali, 2003) (Hirsch, 2005).

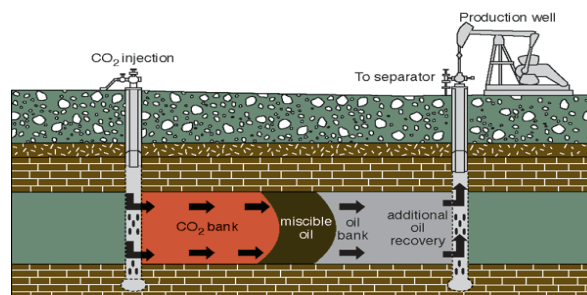
در مرحله اول تولید، نفت توسط انرژی های طبیعی خود مخزن برداشت می شود. به تدریج با برداشت از مخزن طی چندین سال فشار مخزن کاهش پیدا می کند و به جایی می رسد که دیگر تولید از مخزن مقرون به صرفه نیست لذا از روش هایی تحت عنوان تولید ثانویه نفت نظیر تزریق آب یا تزریق گاز در مخازن نفتی بهره می جویند. پس از این مرحله هنوز هم مقداری نفت در مخزن باقی خواهد ماند که از روش های ثالثیه نظیر روش های حرارتی، روش های تزریق مواد شیمیایی، روش میکروبی و زدن چاه های انحرافی استفاده می کنند. به طور کلی روش های مورد استفاده برای بالابردن تولید از مخزن نفتی با عنوان روش های ازدیاد برداشت مورد بررسی قرار می گیرند (Romero-Zerón, 2004) (Lake, 1989) (Taber, 1997) (Farouq-Ali, 2003). روشهای به کار رفته جهت افزایش بازده عبارتند از تزریق گاز (Steam Flooding)، تزریق آب (Water Flooding)، تزریق متناوب آب و گاز (Steam Stimulation)، روش حرارتی (Thermal methods)، تزریق فوم و ژلهای پلیمری (Surfactant Polymer Flooding)، استفاده از مواد شیمیایی کاهش دهنده نیروی کشش سطح و استفاده از روش میکروبی (Hirsch, 2005) (Farouq-Ali, 2003). از آنجا که ویژگی های سنگ و سیال مخازن با یکدیگر متفاوت است، باید روش های متفاوتی برای افزایش برداشت از هر مخزن شناسایی شود. استفاده از مواد شیمیایی کاهش دهنده نیروی کشش سطحی به عنوان موضوعی با مخاطرات زیاد، ولی با ظرفیت فنی بالقوه بالا مطرح است. اگر چه مطالعات زیادی در جهان انجام پذیرفته است، ولی با توجه به شرایط کنونی قیمت نفت، استفاده از برخی مواد شیمیایی غیر اقتصادی می باشد. روش میکروبی از نظر فنی نیاز به رشد بیشتر و طی مراحل تکمیلی خود دارد، اما در آینده به عنوان یک روش تاثیرگذار مطرح است. روش میکروبی در آینده از لحاظ هزینه ای، می تواند قابل رقابت با سایر روش ها باشد. روشهای حرارتی بخصوص تزریق بخار با مشکلاتی همچون نیاز به میزان زیاد سوخت فسیلی جهت تولید بخار میباشد. که علاوه بر صرف هزینه و انرژی باعث انتشار گازهای گلخانه ای خطرناکی میشود. همچنین پایین بودن گرمای نهان تبخیر در مخازن عمیق مانند ایران، باعث از دست رفتن سریع حرارت میشود که این عامل باعث پایین بودن راندمان روشهای حرارتی در مخازن کشور میشود (Grattoni, 2001) (Green, 1998) (Prud'homme, 1983).

در یک دسته بندی کلی می توان روشهای ازدیاد برداشت را به دو دسته روشهای مبتنی بر تزریق گاز و روشهای مبتنی بر تزریق آب تقسیم کرد. در روشهای ازدیاد برداشت که بر پایه آب هستند، آب به عنوان محرک اصلی و یا به عبارتی سیال حامل این روشها به شمار می رود. روشهای شیمیایی، روشهای متناوب، روشهای حرارتی، روشهای میکروبی و ... همگی از آب به عنوان سیال حامل استفاده می کنند. علاوه بر این ها در روشهای انگیزش و تعمیر چاه نیز آب نقش اساسی دارد. در دفع آبهای زائد و سمی که از واحدهای نمکزدایی خارج می شود، تزریق آنها به لایه های زیرزمینی نیز مطرح است که اهمیت مطالعات در آنها کمتر از بحث تزریق آب به مخازن هیدروکربوری نیست (Mohanty, 2003) (Hirsch, 2005). در تزریق آب به مخازن هیدروکربوری با اهداف گوناگون، نکات مختلفی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند. آنالیز آب در علم مهندسی نفت، تنها انجام دادن آزمایشها برای یک منبع مشخص آب نیست، بلکه هدف نهایی، آماده سازی یک منبع آب کاندید به صورت مرحله به مرحله، که در نهایت

بهترین کیفیت ممکن برای آب تزریقی مهیا شود. در بحث ازدیاد برداشت، تزریق آب به مخازن نفتی به دلیل تزریق در لایه آب‌ده مخزن با هدف نگهداری فشار مخزن و تزریق در ستون نفتی به منظور جانشینی نفت مخزن توسط آب و حرکت دادن نفت به سمت چاه تولیدی، انجام می‌گیرد. چگونگی حرکت آب در محیط متخلخل، الگوی مناسب برای تزریق آب، سازگاری آب با شرایط فشار و دمای مخزن، سازگاری آب با سیالات مخزن و... از چالشهای یک پروژه تزریق آب می‌باشند. از این رو شناسایی منابع آب مناسب، انجام مطالعات کیفیت آب و انجام تستهای آزمایشگاهی برای اجرای یک پروژه تزریق آب ضروری است (Stavland, 1995) (Southwell, 1994) (Lockhart, 1994) (Grattoni, 2001).

۱-۱ تزریق گاز

روش تزریق گاز به دو صورت امتزاجی و غیرامتزاجی صورت می‌گیرد (شکل ۱). در روش امتزاجی، گاز طبیعی با افزودن ترکیبات هیدروکربنی میانی غنی میشود؛ به‌طوری که بخش غنی‌شده گاز تزریقی که در ابتدای کار تزریق میگردد، با نفت مخزن امتزاج یافته و آن را از درون خلل و فرج سنگ مخزن به طرف چاههای تولیدی هدایت میکند. راندمان افزایش بازیافت در این روش، بیشترین درصد را به خود اختصاص میدهد و اگر سنگ مخزن دارای خواص همگن و یکدست و تراوایی آن نیز مناسب باشد، به ۶۵ تا ۷۵ درصد حجم نفت باقی‌مانده، میتوان دست یافت (Mohanty, 2003) (Hirsch, 2005).



شکل ۱- طرح شماتیک تزریق گاز به مخازن نفتی

در روش غیر امتزاجی، گاز به مخازن نفتی تزریق میگردد که این تزریق نسبتاً ارزان است و در تعدادی از مخازن نفت‌خیز خشکی و دریایی ایران اعمال میگردد. در این روش، گاز تزریقی در قسمت بالای مخزن متراکم می‌شود و فشار مخازن را افزایش می‌دهد و حرکت نفت را سهولت میبخشد. باید توجه داشت که لزومی ندارد گاز تزریقی حتماً از نوع ترکیبات هیدروکربنی باشد. در کشورهای صنعتی، از گازهای خروجی از تاسیسات بزرگ صنعتی که بخش اعظم آن را دی اکسید کربن تشکیل می‌دهد، برای تزریق استفاده می‌شود. در این روش، حتی راندمان بالاتر از تزریق گازهای هیدروکربنی است و فواید زیست محیطی نیز در پی دارد. با توجه به وجود مخازن گازی زیاد در کشور، میتوان از گاز برای ازدیاد برداشت از چاههای نفت سود جست (Prud'homme, 1983) (Green, 1998) (Grattoni, 2001).

همچنین تزریق گاز به مخازن باید حساب شده باشد، زیرا در غیر این صورت، تعادل دینامیکی چاه به هم می‌خورد و اگر تزریق گاز به درستی انجام نشود، ممکن است باعث رسوب مواد قیری و بسته شدن خلل و فرج گردد. در صورت اتفاق این امر، مخازن برای همیشه غیر قابل استفاده خواهند شد. این روش در چاههایی به کار برده می‌شود که دارای نفت سنگین با ویسکوزیته بالا هستند. از این روش بیشتر در کالیفرنیا و ونزوئلا استفاده می‌شود؛ زیرا در این مناطق نفت سنگین بیشتری نسبت به سایر نقاط دنیا وجود دارد (Yang, 1996) (Sjostrom, 2002) (Bohidar, 2001) (Nijenhuis, 2001).

۲-۱ تزریق آب

روش تزریق آب در بین روش های تزریق سیال به مخزن، روشی بسیار مهم و شناخته شده است و می تواند در صورت انجام موفقیت آمیز، برداشت از مخزن را افزایش دهد (شکل ۲). رواج استفاده از این روش به خاطر عوامل زیر است:

(۱) قابل دسترس بودن و ارزان بودن آب

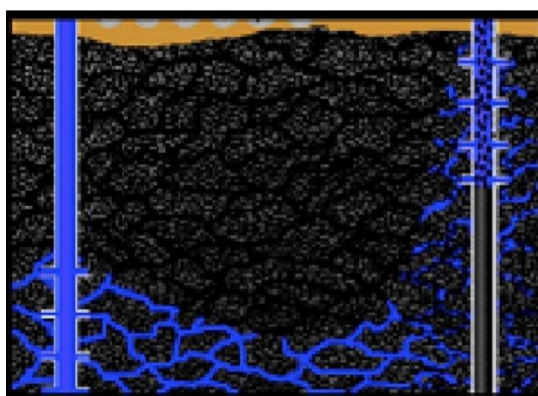
(۲) سادگی روش تزریق آب به داخل مخزن از طریق چاه

(۳) توانایی جریان آب در محیط متخلخل حاوی نفت

(۴) توانایی آب در جاروب کردن نفت

(۵) گرمای ویژه بالای آب

هنگامی که آب به داخل یک مخزن شکافدار طبیعی تزریق می‌شود در اثر نیروی ارشمیدس، آب جایگزین نفت داخل شبکه می‌شود. این اندرکش می‌تواند به روشهای متفاوتی - بسته به خواص شبکه - صورت گیرد. در صورتیکه شبکه آب دوست باشد، توسط آشام موئینگی آب داخل شبکه شده و نفت را از آن خارج می‌نماید اما اگر شبکه نفت دوست باشد، نفت توسط گرادیان فشار خارجی خارج می‌گردد (Lockhart, 1994) (Grattoni, 2001) (Green, 1998). در مورد روش تزریق آب به مخزن نیز باید در استفاده از این روش کمال احتیاط را به کار برد. برخی کارشناسان اعتقاد دارند، بازده این روش مطلوب نیست، زیرا راندمان کار نهایتاً ۳۵ درصد میباشد و اولویت در استفاده از روش تزریق گاز خواهد بود. تزریق آب بیشتر برای مخازن شنی کاربرد دارد و برای مخازن نفتی کشور که عمدتاً شکافدار هستند نباید مورد استفاده قرار گیرد. یکی از مهمترین محدودیت‌های برداشت نفت موجود در شبکه در طی تزریق آب، ویسکوزیته نفت است. ویسکوزیته بالای نفت نرخ آشام را کاهش می‌دهد.

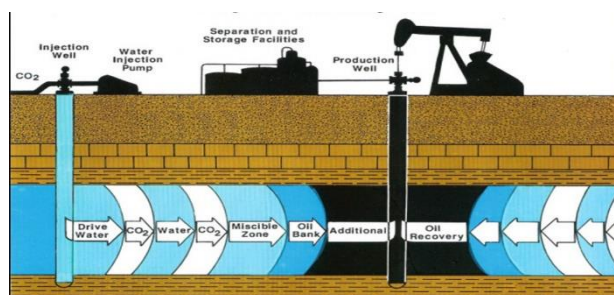


شکل ۲- طرح شماتیک تزریق آب به مخازن نفت در ازدیاد برداشت نفت

نمونه نفت دوست منجر به تولید و برداشت نفت کمتری به نسبت نمونه آب دوست می‌شود. مقایسه برداشت نفت سبک و سنگین از یک نوع سنگ مخزن نشان می‌دهد که برداشت نفت سنگین به دلیل کشش سطحی بالاتر و نفت دوست بودن شبکه پایین است (Stavland, 1995) (Southwell, 1994).

۳-۱ تزریق متناوب آب و گاز

اولین فرآیند تزریق متناوب آب و گاز در سال ۱۹۵۷ در کانادا و بعد از آن در دریای شمال گزارش شده است. میزان متداول افزایش بازیافت نفت از یک مخزن توسط این فرآیند بین ۱۵ تا ۲۰ درصد نفت در جای مخزن می‌باشد. در فرآیند تزریق متناوب، آب و گاز بصورت پی در پی تزریق می‌شوند بدین معنی که یک توده گاز بعد از یک توده آب تزریق می‌شود (شکل ۳). طبقه بندی پروسه‌های تزریق متناوب آب و گاز شامل تزریق متناوب آب و گاز امتزاج پذیر، امتزاج ناپذیر، مرکب و انواع دیگر آن تزریق همزمان آب و گاز و تزریق متناوب آب و بخار است (Stavland, 1995) (Southwell, 1994).

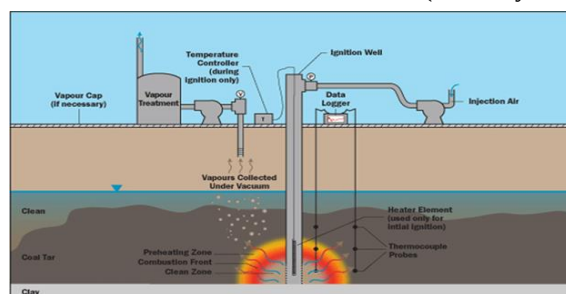


شکل ۳- طرح شماتیک تزریق متناوب آب و گاز به مخازن نفت در ازدیاد برداشت نفت

اما این روش نیز مانند روش های دیگر دارای مشکلات عملیاتی است که باید به آن توجه شود، این مشکلات شامل کاهش حجم سیال تزریقی و به تبع آن افت فشار مخزن، خوردگی تجهیزات به سبب جریان گاز، پوسته پوسته و پولکی شدن ساختار، به وجود آمدن رسوبات آسفالتین و هیدراته و دماهای متفاوت فازهای تزریقی می باشد. این روش با تزریق آب یا گازی که به منظور حفظ و نگهداری فشار مخزن انجام می گیرد، متفاوت است. چرا که در تزریق آب و گاز برای حفظ فشار مخزن، سیال تزریقی باعث حرکت نفت نمی شود، بلکه از افت سریع فشار مخزن در اثر بهره برداری جلوگیری می کند (Mohanty, 2003) (Hirsch, 2005).

۴-۱ روش حرارتی

روشهای حرارتی پیچیده تر از تزریق آب و مواد شیمیایی است. معمولاً در بهره برداری از مخازنی که نفت آنها نسبتاً سنگین است، به کار برده میشود. از جمله این روش ها می توان به ایجاد حرارت در مخزن با سوزاندن بخشی از نفت اشاره کرد (شکل ۴). این عمل با تزریق گاز دارای اکسیژن، حفر چاههای تزریقی معین و ایجاد یک جبهه آتش پیش رونده صورت می گیرد. البته برای ایجاد این حرارت روشهای متفاوتی پیشنهاد شده است؛ ولی تنها در روشهایی که از گاز اکسیژن دار استفاده می شود، جبهه آتش در یک جهت حرکت می کند و می توان به نتیجه مطلوب رسید. تولید حرارت در خارج مخزن و تزریق سیال گرم به عنوان عامل جابه جا کننده: این روش شامل تزریق بخار و آب به صورت مرحله ای و متناوب (تزریق چرخشی یا متناوب) و یا تزریق بخار به طور ممتد می باشد (Hirsch, 2005) (Mohanty, 2003).



شکل ۴- طرح شماتیک ازدیاد برداشت حرارتی

۵-۱ مکانیزم های تولید نفت در بازیافت حرارتی از مخزن

افزایش درجه حرارت، بر روی خواص فیزیکی سیالات و همچنین تأثیرات متقابل سنگ و سیال، اثر می گذارد. مکانیزم های اصلی ناشی از این تأثیرات که به تولید نفت منجر می شوند، عبارتند از:

- ۱- کاهش ویسکوزیته خصوصاً در مورد نفت های سنگین
- ۲- میزان ترشوندگی سنگ تغییر پیدا می کند؛ تمایل به ترشوندگی توسط آب در درجه حرارت بالا افزایش می یابد.
- ۳- کشش سطحی بین نفت و آب با افزایش درجه حرارت کاهش پیدا می کند.
- ۴- انبساط حرارتی باعث می شود که سیال موجود در خلل و فرج سنگ به بیرون تراوش پیدا کند؛ در این حالت، چون انبساط حرارتی نفت خصوصاً نفت های سبک کمتر از آب است، در ابتدا نفت خارج می شود.

۵- نفت‌های سبک تبخیر می‌شوند (Bohidar, 2001) (Nijenhuis, 2001).

۱-۶ استفاده از امواج الکترو مغناطیس (Electro Magnetic Heating (EMH))

از جمله روشهای نوین در ازدیاد برداشت برای مخازن دارای نفت نیمه سنگین و سنگین روش EMH می باشد که در آن از امواج الکترو مغناطیس برای گرم کردن نفت درون مخزن استفاده میشود. به همین دلیل این روش را جزء روشهای حرارتی ازدیاد برداشت بشمار می آوریم. که در آن با ایجاد یک میدان مغناطیسی متغییر با فرکانس بالا انرژی مولکولها افزایش داده و در نهایت از گرمای تولید شده برای ازدیاد برداشت نفت استفاده می شود. محدوده فرکانسهای بکار رفته در این روش از چند مگا هرتز تا ۳۰۰ مگا هرتز می باشد که فرکانس بهینه برای هر مخزن به جنس آن مخزن بستگی دارد. از جمله مزایای این روش قابلیت استفاده همزمان آن با سایر روشهای ازدیاد برداشت می باشد (Yang, 1996) (Fevola, 2003) (Romero-Zerón, 2004).

۱-۷ روش میکروبی

رانش میکروبی توسط تزریق محلولی از میکروارگانیزمها و مواد غذایی مانند ملاس صنعتی درون چاه تزریقی حفر شده در مخزن نفت صورت می گیرد. تغذیه میکروارگانیزمها از مواد غذایی آنها باعث ایجاد مواد مختلفی از جنس اسیدها و سورفاکتانتها تا گازهایی مانند هیدروژن و دی اکسید کربن می شود. این محصولات به روشهای گوناگونی بر نفت در جا تأثیر گذاشته و موجب حرکت آسانتر آن در مخزن به سوی چاههای تولیدی می شوند (Mohanty, 2003).

۱-۸ روش تزریق مواد شیمیایی و یا فوم

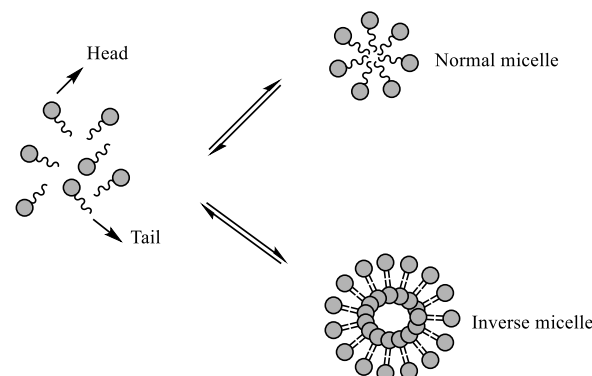
این روش به منظور کاهش نیروی کشش سطحی بین سنگ و سیال، با تنظیم نسبت تراوایی به گرانروی نفت مخزن، مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از روش تزریق فوم و مواد شیمیایی، به طور مثال در برخی از میداین نروژ به صورت آزمایشی با موفقیت انجام پذیرفته است. اگر چه مطالعات زیادی در جهان انجام پذیرفته است، ولی با توجه به شرایط کنونی قیمت نفت، استفاده از برخی مواد شیمیایی غیر اقتصادی میباشد. روشهای بازیافت شیمیایی شامل تزریق پلیمر، پلیمر میسلی و قلیارویی است. در حال حاضر تزریق پلیمر متداولترین روش تزریق مواد شیمیایی است (Mohanty, 2003).

۱-۹ پلیمرروبی میسلی (Micellar-Polymer Flooding)

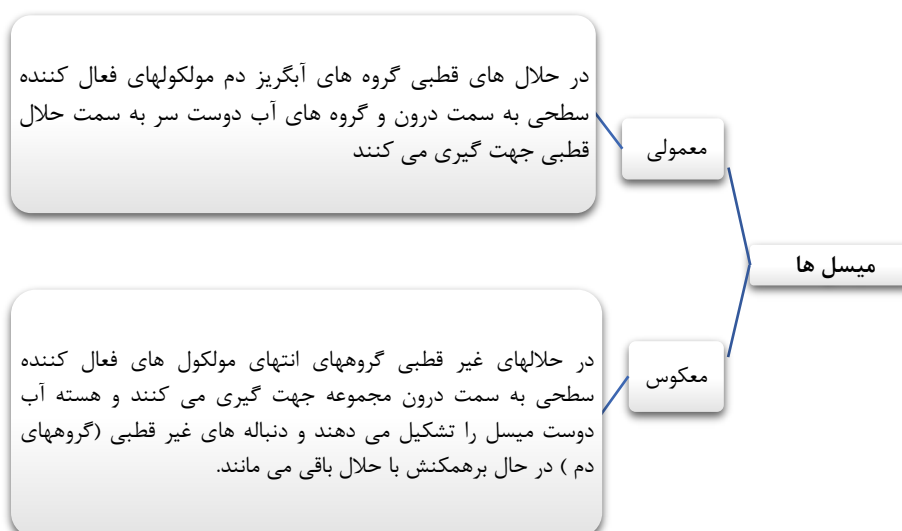
این روش از تزریق توده میسلی شامل مخلوطی از سورفاکتانتها، شبه سورفاکتانتها، الکل، آب شور و نفت بهره می برد که درون سازند حاوی نفت حرکت می کند و نفت به دام افتاده بیشتری را از سنگ مخزن رها می کند. این روش یکی از کاراترین روشهای EOR است و در عین حال از گرانترین روشها نیز می باشد. همانطور که مایع ظرفشویی باعث آزاد شدن چربی از سطح ظروف می شود و بعد می توان با جریان آب چربیها را پاک کرد. وقتی که این محلول میسلی در سازند حاوی نفت درون مخزن به حرکت در می آیند باعث آزاد شدن مقدار زیادی از نفت محبوس در سنگ مخزن می شود. برای افزایش تولید، آب تغلیظ شده با پلیمر جهت کنترل تحرک، بعد از توده میسلی تزریق می گردد. آب شیرین پس از پلیمر تزریق میشود تا از آلوده شدن مواد شیمیایی نیز جلوگیری نماید (Sjostrom, 2002) (Bohidar, 2001). محلول مایسلار مخلوطی از آب، مواد فعال سطحی، نفت و نمک است. در روشهای جدید تهیه محلول مایسلار، نفت، نمک و مواد کمکی فعال سطحی حذف گردیده اند. محلولهای مایسلار نیروی تنش سطحی بین آب و نفت را تا حدود 0.001 dyne/cm یا کمتر از آن کاهش میدهد. گرانروی محلول پلیمری حدود ۲ تا ۵ برابر گرانروی نفت است. غلظت پلیمر حدود ۱۰۰۰ ppm می باشد. در حال حاضر از پلی اکریامیدها و زیست پلیمرها به عنوان پلیمر در محلول بافر استفاده می شود. مواد فعال سطحی معمولاً سولفوناتهای نفتی سدیم هستند و از لحاظ خواص و ساختار شیمیایی شبیه شوینده ها می باشند. از الکلها برای مواد کمکی فعال سطحی استفاده می شود. هزینه تهیه محلولهای مایسلار برای تولید هر بشکه نفت در سال ۱۹۷۵ حدود ۱/۵ دلار آمریکا بوده است (Sjostrom, 2002) (Bohidar, 2001).

۱-۱۰ سورفکتانت

سورفکتانت‌ها معمولاً ترکیباتی آلی هستند که دارای گروه‌های هیدروفوبیک (آب گریز) که نقش دم و دنباله را دارد و گروه‌های هیدروفیلیک (آب دوست) که نقش سر را دارد می‌باشند (شکل ۵) بنابراین معمولاً به طور ناچیز در آب و حلال‌های آلی حل می‌شوند. سورفکتانت یک ماده‌ی عمل‌کننده در سطح است. به این معنی که هنگامی که بر روی سطح یک مایع گسترده می‌شود، کشش سطحی را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد (Mohanty, 2003).



شکل ۵- طرح شماتیک میسل‌های مورد استفاده در محلول آبی برای ازدیاد برداشت نفت



شمای ۱- دسته‌بندی میسل‌ها

مولکول‌های فعال‌کننده سطحی در محلول‌های بسیار رقیق به صورت منومر هستند. البته ممکن است دایمرها و تریمرها نیز حضور داشته باشند. وقتی غلظت مولکول‌های فعال‌کننده سطحی به یک مقدار مناسب برسد، تجمع خودبخود اتفاق می‌افتد و میسل تشکیل می‌شود. میسل به معنی تکه کوچک است. غلظتی که در آن میسل تشکیل می‌شود غلظت بحرانی میسل شدن CMC نامیده می‌شود. در این غلظت، میسل‌ها از حدود ۲۰۰-۴۰۰ منومر فعال‌کننده سطحی پدید می‌آیند. میسل‌ها از نظر ترمودینامیکی پایدارند و به آسانی تکرارپذیر می‌باشند. اگر غلظت فعال‌کننده‌های سطحی در اثر رقیق نمودن با آب به پایین‌تر از CMC رسانده شود، میسل تخریب می‌شود. اندازه میسل‌ها به دما بستگی کامل دارد. کاهش دما باعث بزرگ شدن قطر میسل می‌شود که این امر به دلیل گرمایی می‌باشد (Fevola, 2003) (Yang, 1996).

۱-۱- قلیارویی (Alkaline Flooding)

مستلزم تزریق مواد شیمیایی قلیایی (پتاس یا محلولهای سوزآور) درون مخزن است که به علت واکنش با اسیدهای موجود در نفت تولید سورفاکتانت کرده و آن هم به نوبه خود با کاهش کشش سطحی، موجب تغییر ترشوندگی سطح سنگ مخزن و یا ایجاد امولسیون شده و به آزاد شدن نفت از سنگها کمک می‌کند. در نتیجه نفت با سهولت بیشتر می‌تواند درون مخزن به سمت چاههای تولیدی حرکت کند. تغییرات جدیدی که در اجرای این روش صورت گرفته عبارتست از افزودن سورفاکتانت و پلیمر به مواد قلیایی که روش Alkaline-Surfactant-Polymer نامیده میشود و اساساً هزینه کمتری نسبت به روش پلیمرروبی میسلی دارد. روش قلیارویی معمولاً می‌تواند موثرتر باشد به شرطی که حجم اسید موجود در مخزن نسبتاً بالا باشد (Bohidar, 2001) (Sjostrom, 2002).

۱-۲- پلیمر رویی (Polymer Flooding)

اغلب در مخازنی استفاده می‌شود که روش آبرویی در آنها کارایی لازم را ندارد مثل مخازنی که به دلیل شکستگی یا تراوی بالا باعث انحراف جریان و هرزروی آب تزریقی میشوند یا مخازنی که به علت وجود نفت سنگین در مقابل جریان آب مقاومت می‌کنند. برای ممانعت از رد شدن آب تزریقی از نفت، می‌توان آب را با افزایش پلیمرهای محلول در آن تغلیظ کرده و گرانیوی آن را بیشتر نمود. این کار باعث می‌شود آب درون سنگهای مخزن پراکنده شده و درصد بازیافت نفت بالا رود. پس از محلول پلیمری، آب شیرین تزریق میشود تا از آلوده شدن آن با آب شوری که باعث رانش نهایی می‌شود جلوگیری گردد. در این روش، اغلب از پلیمرهای سنتزی در رده بندی پلی‌اکریلید آمید و پلیمر بیولوژیکی زانتاگام استفاده می‌شود. اگرچه پلیمرهای بیولوژیکی در مقابل تغییرات دما حساس‌ترند، اما به دلیل ارزانی، زانتاگام جایگاه مناسبی در این روش دارد. این روش در اواسط دهه ۵۰ میلادی توسعه یافت، در سال ۱۹۶۰ از پلیمرهای جدیدی با وزن مولکولی بالا بین ۳ تا ۹ میلیون استفاده شد که موفقیت‌آمیز بوده است (Yang, 1996) (Romero-Zerón, 2004) (Fevola, 2003) (Sydansk, 1990).

۲- روش های افزایش برداشت نفت با استفاده از پلیمرها

در سال های اخیر با توجه به افزایش چشمگیر قیمت نفت، بالا رفتن هزینه روشهای انجام شده، پایین بودن ضریب بازیافت نفت، و به خصوص پایین آمدن قیمت پلیمرها و همچنین پیشرفت های انجام شده در زمینه ی استفاده از چاه های افقی زمینه مناسبی برای تزریق پلیمر فراهم شده است. تزریق پلیمر به منظور افزایش بازیافت نفت بیش از ۴۰ سال است که مورد توجه قرار گرفته است و موجب بازیافت تا ۳۰ درصد محصول می شود. با توجه به کاهش تولید آب و افزایش تولید نفت، هزینه تزریق پلیمرها بسیار کمتر از سایر روش های مورد استفاده می باشد. در روش تزریق پلیمرها به ازای استفاده از ۰/۳ تا ۰/۸ کیلوگرم پلیمر، یک بشکه نفت بازیافت می شود. با اضافه کردن پلیمر به آب، ویسکوزیته محلول افزایش و نفوذپذیری آب به دلیل اتصالات مکانیکی و کاهش جنبش مولکول ها، کاهش می یابد (Lockhart, 1994) (Grattoni, 2001). در این روش، فرآیند با پمپاژ آب شامل سطح فعال به منظور کاهش کشش سطحی بین فاز آب و روغن و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن برای بهبود بازیابی نفت شروع می شود. پلیمر سپس با آب مخلوط شده و به طور پیوسته برای مدت زمان طولانی تزریق می شود. هنگامی که ۳۰٪ تا ۵۰٪ از حجم مخزن تزریق شد، اضافه کردن پلیمر متوقف شده و آب به منظور حرکت پلیمر مجدداً تزریق می شود و مخزن نفت به سمت دیواره جلویی چاه هدایت و استخراج صورت می گیرد. پلیمرهای مورد استفاده در افزایش بازیافت نفت به دو دسته پلیمرهای سنتزی و بیوپلیمرها تقسیم می شوند (Sjostrom, 2002) (Bohidar, 2001). اغلب پلیمرهای سنتزی شامل پلی اکریل آمید و پلی اکریل آمید نیمه هیدرولیز شده، پلی ساکاریدهای بیولوژیکی، زانتان، پلیمرهای طبیعی اصلاح شده شامل هیدروکسی اتیل سلولز، صمغ گوار و سدیم کربوکسی متیل سلولز و کربوکسی اتوکسی هیدروکسی اتیل سلولز می باشند. هر یک از پلیمرها دارای مزایا و معایب خاص خود برای یک مخزن خاص می باشند. پلی اکریل آمید با وزن مولکولی بالا موجب غلیظ شدن محلول آبی می شود و تا ۹۰ درجه سانتی گراد در شوری نرمال و تا ۶۲ درجه سانتی گراد در شوری آب دریا پایدار است. اما در شوری بالا ویسکوزیته محلول به طور چشمگیری کاهش می یابد. پلی اکریل آمید نیمه هیدرولیز یکی از بهترین انواع پلیمرها در بازیافت نفت است که از هیدرولیز جزئی پلی اکریل آمید و یا کوپلیمریازسیون اکریل آمید و سدیم اکریلات ساخته می شود (Southwell, 1994) (Lockhart, 1994). پلی اکریل آمید نیمه هیدرولیز، ارزان قیمت است و در برابر حمله باکتریایی

مقاوم و توانایی تحمل نیروهای مکانیکی بالا در جریان تزریق به مخزن را دارا می باشند. این پلیمر می تواند برای درجه حرارت تا ۹۹ درجه سانتی گراد با توجه به درجه سختی آب شور استفاده شود. پلی آکریل آمید نیمه هیدرولیز سولفونه نیز تا دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد را تحمل می کنند. اما این دسته از پلیمرها دارای نسبت به شوری آب، سختی و حضور سطح فعال ها یا دیگر ترکیبات شیمیایی بسیار حساس هستند، بنابراین در مخازن حاوی نمک قابل استفاده نیستند. صمغ زانتان، یک پلی ساکارید است که با استفاده از باکتری های مختلف (مانند زانتوموناس) از طریق تخمیر گلوکز و فروکتوز تولید می شود. این مولکول به طور کلی دارای وزن بسیار بالا مولکولی و زنجیره های پلیمری بسیار سخت می باشند که موجب غیر حساس بودن این ترکیب نسبت به شوری و سختی بالا می گردد. این پلیمر با اکثر سطح فعال ها و مواد افزودنی به سیالات در بازیافت سازگار است (Sjostrom, 2002) (Bohidar, 2001). صمغ زانتان در محدوده دمایی ۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی گراد پایداری حرارتی دارند، اما نسبت به تجزیه باکتریایی بسیار حساس هستند و کاربرد این ترکیبات را بسیار محدود می کند. با توجه به پلیمرهای استفاده شده و نقاط ضعف آنها، انتخاب پلیمر مناسب برای افزایش بازیافت پلیمر با توجه به ویسکوزیته محلول، نفوذپذیری مخزن و گرانیوی نفت دقت کرد. در سال های اخیر استفاده از پلیمرهای آبدوست و حساس به دما در افزایش بازیافت نفت مورد توجه قرار گرفته است و سنتز نانو ذرات سیلیکای کلئیدی با پلیمریزاسیون امولسیون با در نظر گرفتن خواص اندازه و پایداری نانوذرات و بررسی تأثیر مخلوط نانوذرات سیلیکای کلئیدی با پلیمر حساس به دما، به منظور افزایش بازده استخراج نفت و طراحی و ساخت محیط متخلخل (مغزه) با خصوصیات قابل کنترل در حال انجام است (Southwell, 1994) (Lockhart, 1994).

۲-۱- بهبود فرآیند ازدیاد برداشت نفت به روش تزریق آب با افزودن مواد پلیمری

با توجه به کاهش روزافزون منبع نفتی در جهان، به کارگیری روش های بازیابی و ازدیاد برداشت نفت از مخازن امری ضروری و لازم می باشد. یکی از روش های رایج و ارزان ازدیاد برداشت از مخازن نفت، تزریق آب می باشد. از مزایای این روش می توان سهولت تزریق آب، در دسترس بودن آب، قابلیت بالای پخش آب در طول ناحیه نفتی و راندمان بالای جابه جا کردن نفت توسط آب در ناحیه نفت خیز را نام برد. یکی از مشکلات اصلی این روش پایین بودن راندمان جاروب زنی حجمی آب مخصوصا در مخازن ناهمگن می باشد. راندمان این روش را با افزودن پلیمرهای محلول در آب و در نتیجه افزایش گرانیوی سیال تزریق شده، افزایش می دهند. تزریق آب در مخازن به منظور ازدیاد برداشت نفت از اوایل دهه سی میلادی در ایالات متحده آغاز شد. این فرآیند با افزایش فشار مخزن سبب تحریک مخزن و خروج محصول می گردد. یکی از پارامترهای مهم در فرآیند ازدیاد برداشت به روش تزریق آب، کنترل تحرک می باشد. که هدف از آن بهبود راندمان جا به جایی حجمی فرآیند جا به جایی می باشد. کنترل تحرک با نسبت تحرک بیان می شود. با افزودن مواد شیمیایی به سیال تزریق شونده به مخازن، گرانیوی آن افزایش می یابد. که این امر سبب کاهش نسبت تحرک و افزایش راندمان جاروب زنی می شود (Nijenhuis, 2001) (Stavland, 1995). معمولا اگر سیال تزریقی آب باشد، از پلیمر برای این منظور استفاده می شود. کاهش نقطه تحرک آب سبب به تاخیر افتادن نقطه گذر آب و بهبود راندمان جابه جایی و جاروب عمودی و جانبی می شود و نفت بیشتری در یک برش آبی معین به دست می آید. تزریق پلیمری از طریق بهبود راندمان جا به جایی و افزایش حجم مخزن در تماس با آب، نفت بیشتری نسبت به تزریق آب تولید می کند. راندمان بازیابی کلی برای تزریق آب، ۲۲-۳۹٪ می باشد. این مقدار برای تزریق پلیمری، ۲۵-۵۵٪ است. تاکنون تلاش های زیادی برای بهبود راندمان ازدیاد برداشت نفت به روش تزریق آب انجام گرفته است که شامل افزودن برخی مواد شیمیایی شامل پلیمرها در آب و افزایش ویسکوزیته آن می شود (Bohidar, 2001) (Nijenhuis, 2001) (Stavland, 1995) (Southwell, 1994).

نتیجه گیری

به منظور افزایش طول عمر منابع نفتی کشور و ابقای این منابع برای نسل های آینده، حفظ و صیانت مخزن، بالابردن راندمان تولید و نگه داشتن آن در حد مطلوب در طول زمان الزامی است. در سالیان اخیر روش های ازدیاد برداشت از مخازن نفتی موجب باز شدن مسیر جدیدی در بهبود عملکرد مخازن نفتی گشته است. براساس ویژگی های هر مخزن، روش های مختلفی برای افزایش بازیافت نفت از مخازن اعمال می شود که شامل تزریق گاز، تزریق آب، تزریق متناوب آب و گاز، روش حرارتی، تزریق فوم و ژل های پلیمری، استفاده از مواد شیمیایی کاهش دهنده نیروی کشش سطحی و روش میکروبی می باشد. در این مقاله در مورد این روش ها توضیحاتی ارائه شد و معایب و مزایای هر روش مطرح شد.

مراجع

- 1- Bohidar, H. B.(2001) *Dynamics in Thermoreversible Polymer Gels.*, Curr. Sci. ,80.pp.1008-1017.
- 2- Deffeyes, K.S.(2008). *The Impending World Oil Shortage, New Jersey: Princeton University.*
- 3- Farouq-Ali, S. M.(2003) *Practical Heavy Oil Recovery.* H.O.R. Edmonton: Heavy Oil Technologies Ltd.
- 4- Fevola, M. J.(2003) *Model Polyzwitterions Based on Polyacrylamide: Synthesis, Characterization, and Stimuli-responsive Solution Behavior in Aqueous Media.* Ph.D. Dissertation. University of Southern Mississippi, Hattiesburg.
- 5- Grattoni, C. A., Al-Sharji, H. H., Yang, C., Muggeridge, A. H., Zimmerman, R. W.(2001) *Rheology and Permeability of Crosslinked Polyacrylamide Gel*, J. Coll. Interface Sci. 240.pp.601-607.
- 6- Green, D.W., Willhite, G. P.(1998) *Enhanced Oil Recovery.* Richardson, TX: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME SPE.
- 7- Hirsch, R. L., Bezdek, R., Wendling, R. (2005) *Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation, and Risk Management*, National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy.
- 8- Lake, L. W.(1989) *Enhanced Oil Recovery.* Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- 9- Lockhart, T. P., Albonico, P.(1994) *New Chemistry for the Placement of Chromium (III)/Polymer Gels in High Temperature Reservoirs*, SPE. Prod. Facil., 9.pp.273-279.
- 10- Mohanty, K. K.(2003) *The Near-term Energy Challenge.* AIChE J. 40.pp.2454-2460.
- 11- Prud'homme, R. K., Uhl, J. T., Poinsatte, J. P., Halverson, F.(1983) *Rheological Monitoring of the Formation of Polyacrylamide/CrC₃ Gels*, SPE J., 23.pp.804-808.
- 12- Nijenhuis, K.(2001) *Crosslink Nature in Cr(III)-Polyacrylamide Gels*, Macro-mol. Symp., 171.pp.189-200.
- 13- Reynolds, D. B.(2002) *Scarcity and Growth Considering Oil and Energy: An Alternative Neo-Classical View*, Lewiston: NY: Edwin Mellen .
- 14- Romero-Zerón, L. B.(2004) *Characterization of Crosslinked Gel Kinetics and Gel Strength using NMR. Paper No. SPE 86548.* SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, LA.
- 15- Romero-Zerón, L. (2004) *The Role of Porous Media Wettability of Foamed Gel Propagation and Fluid Diverting Performance.* Ph.D. Dissertation, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- 16- Sjostrom, J.(2002) *Surfactant Responsive Cross-linked Polymer Hydrogels: The History of Cross-linked Polymer Gels.* Ph.D. Dissertation, Lund University, Lund, Sweden,.
- 17- Southwell, G. P., Posey, S. M.(1994) *Applications and Results of Acrylamide- Polymer/Chromium (III).* Paper No. SPE DEO 27779, SPE/DOE Ninth Symposium on Improved Oil Recovery. Tulsa.
- 18- Stavland, et.al.(1995) *Critical Parameters for Deep Emplacement of Gels.* First Annual International Conference on Reservoir Conformance Profile Control. Houston, TX.
- 19- Sydansk, R.(1990) *A Newly Developed Chromium (III) Technology*, SPE Reservoir Eng., pp.346-351.
- 20- Taber, J. J., Martin, F. D., Seright, R. S.(1997) *EOR Screening Criteria Revisited. Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects*, SPE Reservoir Eng. 12.pp.189-198.
- 21- Yang, Y.(1996) *Synthesis and Characterization of Hydrophobically Modified Polyacrylamide-based Polymers.* Ph.D. Dissertation, University of New York, New York, NY

استفاده از سورفکتانت آنیونی با هدف افزایش بازیافت نفت برای مخازن نفت معمولی با استفاده از سیلاب زنی^۱

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده^۲

گروه مهندسی نفت، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران.

چکیده

سورفکتانت‌ها با تغییر ترشوندگی سنگ مخزن بوسیله کاهش کشش سطحی باعث جابه‌جایی نفت به تله افتاده در سنگ مخزن گردیده و میزان نفت بیشتری را استخراج می‌کنند. هدف از انجام این پژوهش استفاده از سورفکتانت آنیونی با هدف افزایش بازیافت نفت برای مخازن نفت معمولی با استفاده از سیلاب زنی می‌باشد که بطور آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. لذا در این کار از سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات (SDS) در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm استفاده شده است. همچنین ضریب تخلخل در همه آزمایش‌ها ۳۰٪ می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده از تست‌های انجام شده نشان داد که تزریق سورفکتانت آنیونی کشش سطحی بین نفت و سنگ بستر را کاهش داده و باعث جدا شدن نفت از سنگ مخزن شد که برداشت نفت از مخزن را بهبود بخشیده است.

کلمات کلیدی: سورفکتانت، بازیافت نفت، مخازن نفتی، سیلاب‌زنی

۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی شامل نفت و گاز در عمق سه تا چهار کیلومتری اعماق زمین و در خلل و فرج لایه‌های آن و با فشار زیاد ذخیره می‌باشند. گازهای طبیعی زیرزمینی یا به تنهایی و یا به همراه نفت تشکیل کانسار (معدن) می‌دهند. که در هر دو صورت از نظر اقتصادی بسیار گران‌بها می‌باشد. در صورت همراه بودن با نفت گازها در داخل نفت حل می‌شوند، عمدتاً نیز به همین صورت یافت می‌گردد. در این رابطه مولفه‌های فیزیکی مواد - حرارت و فشار مخزن تأثیرات مستقیم دارند و نهایتاً در صورت رسیدن به درجه اشباع تجزیه شده و به لحاظ وزن مخصوص کمتر در قسمت‌های فوقانی کانسار و بر روی نفت یا آب به شکل گنبدی‌های گازی قرار می‌گیرند. گاهی در مخازن گازهای محلول در آب نیز مشاهده شده است.

گاز متان در حرارت و فشار موجود در کانسارها متراکم نمی‌گردد، بنابراین همیشه بصورت گاز باقی مانده ولی در مخازنی که تحت فشار بالا هستند به شکل محلول در نفت در می‌آید. سایر اجزای گاز طبیعی در مخازن نسبت به شرایط موجود در کانسار در فاز مایع یا فاز بخار یافت می‌شوند. گازهای محلول در نفت به مثابه انرژی و پتانسیل تولید مخزن بوده و حتی المقدور سعی می‌گردد به روش‌هایی از خروج آنها جلوگیری گردد، ولی در هر حال بسیاری از گاز محلول در نفت در زمان استخراج همراه با نفت خارج می‌گردد. در سالهای پیش از انقلاب درصد بالایی از آن از طریق مشعل سوزانده می‌شد و به هدر می‌رفت ولی در سالهای بعد تا بحال به تدریج و با اجرای طرح‌هایی از جمله طرح آماک از آنها به عنوان تولیدات فرعی استحصالی از میادین نفت کشور به منظور تزریق به مخازن نفتی - تولید مواد خام شیمیایی و سوختی با ارزش استفاده می‌کنند [۱].

عمر بیشتر مخازن نفتی دنیا به نیمه دوم خود رسیده است، به همین دلیل میزان برداشت نفت از آنها به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، به همین دلیل شرکت‌های نفتی از روش‌های ازدیاد برداشت با استفاده از فناوریهای نوین برای بهره‌وری بیشتر در برداشت از ذخایر نفتی استفاده می‌کنند. از دیدگاه تاریخی، برداشت نفت از مخازن به سه مرحله تقسیم می‌شود. مرحله آغازین

^۱- این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

^۲- نویسنده مسئول: asad.malekzadeh@gmail.com

تولید با استفاده از انرژی طبیعی موجود در مخزن که منبع اصلی انرژی برای جابجایی نفت به سمت چاه تولیدی است، انجام می‌شود. منبع این انرژی طبیعی رانش کلاهدک گازی، رانش آبد، رانش گاز محلول، انبساط سنگ و سیال، و ریزش ثقی است. در این مرحله تنها در حدود ۳۰-۵ درصد نفت اولیه موجود در مخزن OOIP برداشت می‌شود [۲]. مرحله دوم عملیات به طور معمول بعد از کاهش انرژی مخزن و در نتیجه کاهش برداشت نفت، استفاده می‌شود. برداشت ثانویه با افزایش انرژی طبیعی مخزن با کمک تزریق آب یا گاز انجام می‌شود. در این فرآیند گاز و آب را می‌توان برای تثبیت فشار با انبساط کلاهدک گازی و آبد و یا رویکرد جابه‌جایی غیرامتزاجی نفت بر مبنای نفوذپذیری نسبی و روبش حجمی، داخل ستون نفتی تزریق کرد. جابجایی غیرامتزاجی گازی به اندازه سیلابزنی مفید نیست و امروزه به ندرت بعنوان برداشت ثانویه استفاده می‌شود. بنابراین سیلابزنی به طور معمول معادل این برداشت طبقه‌بندی می‌شود. آب، نفت را به سمت چاههای تولیدی می‌راند و این فرآیند تا زمانی که نسبت آب به نفت در چاههای تولیدی زیاد شود و تولید نفت بیشتر صرفه اقتصادی نداشته باشد، ادامه می‌یابد. در پایان این مرحله برداشت نفت به ۶۰-۴۰ درصد می‌رسد [۲].

تزریق آب به مخزن دو اثر عمده را در پی دارد:

با نگه داشتن فشار مخزن بالاتر از نقطه حباب، از آزاد شدن گاز در مخزن جلوگیری کرده و نفوذپذیری نسبی نفت را بالا نگه می‌دارد. نفت را در جلوی جبهه آب به سمت چاههای تولیدی می‌راند.

در پایان این مرحله، در اثر عواملی که به طور عمده ناشی از شرایط ترشوندگی نامطلوب، ناهمگنی سنگ مخزن و به دام افتادن نفت در اثر موینگی است، مقدار قابل توجهی از نفت (OOIP ۶۰-۴۰ درصد مخزن باقی می‌ماند. برای برداشت این مقدار نفت و افزایش برداشت نهایی، روش‌های ازدیاد برداشت نفت (EOR) مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که این روش‌ها اغلب بعد از روشهای ثانویه به کار گرفته می‌شوند، روشهای ثالثیه برداشت نیز نامیده می‌شوند. هدف از این روش‌ها، افزایش مدت زمان تولید مخازن با تقویت سیلابزنی و یا سایر روشهای مرسوم که به حد صرفه اقتصادی خود رسیده‌اند، است. روشهای بهبود برداشت نفت تعریف گسترده‌تری نسبت به EOR داشته و شامل همه روشهایی که منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود از جمله تزریق آب و گاز و روش‌های EOR است. در بحث ازدیاد برداشت، تزریق آب به مخازن نفتی به دو دلیل عمده انجام می‌شود:

(۱) تزریق در لایه آبد مخزن با هدف نگهداری فشار مخزن.

(۲) تزریق در ستون نفتی به منظور جانشینی نفت مخزن توسط آب و حرکت دادن نفت به سمت چاه تولیدی [۲].

در سال ۲۰۰۲ ویات و همکارانش، از ترکیب دو سورفکتانت کاتیونی و آمفوتری برای تغییرات ترشوندگی سطوح کربناته استفاده نمودند. با توجه به نتایج به دست آمده حضور مواد اسیدی در محیط موجب کاهش توانایی مواد نام برده بر بازدهی برداشت نفت می‌شوند. در کنار تغییر خاصیت ترشوندگی مخازن کربناته از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست، بایستی کشش سطحی بین محلول و نفت در حد بالایی باقی بماند تا آب بتواند با آشام به درون ماتریس، نفت را با نرخ مناسب به بیرون مخزن هدایت کند. بنابراین برای تغییر خاصیت ترشوندگی سطوح مخازن کربناته و کاهش همزمان کشش بین سطحی، یک مقدار بهینه از غلظت سورفکتانت وجود دارد که بایستی به آن توجه نمود [۳].

در سال ۲۰۰۳ استاد و همکارانش، جهت بررسی مکانیزم تغییر ترشوندگی در حضور محلول حاوی مواد کاهش‌دهنده‌ی کشش بین سطحی آزمایش‌هایی انجام دادند. نتایج اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس استاتیکی نشان داد که غلظت ماده‌ی کاهش‌دهنده‌ی کشش بین سطحی در دفع کربوکسیلات‌ها از سطح کلسیت موثر می‌باشد. در غلظت‌های کمتر از غلظت بحرانی میسل (CMC^1)، دفع متوقف می‌شود و کربوکسیلات‌های دفع شده باید در میسل‌ها یا در فاز نفتی ذخیره شوند تا تغییر ترشوندگی دینامیکی در محیط متخلخل حفظ شود. آزمایش‌های دینامیکی با استفاده از نفت مدل شامل اسیدهای چرب مختلف و ان-دودسیل‌تری متیل‌آمونیم برمید با نام تجاری $C_{12}TAB$ حل شده در آب نمک، نشان داد که محلول حاوی مواد کاهش‌دهنده‌ی کشش بین سطحی بصورت خودبه‌خودی در محیط نفت‌دوست آشام می‌شود. رژیم جریان غیرهمسو ناشی از جریان موئینگی می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی تغییر در ترشوندگی سنگ مخزن است [۴].

در سال ۲۰۱۱ سیدی و همکارانش، از دو نوع سورفکتانت مختلف به نام‌های اکتیل‌پلی‌سولفون و تترالکیل‌آمونیم به ترتیب با نام‌های تجاری Triton X-100 و $C_{16}TAB$ برای تعدیل خاصیت ترشوندگی در مغزه‌ی آزمایشگاهی استفاده کردند. مغزه‌ی

مورد استفاده در این بررسی صفحه‌ی میکا بود که به مدت زیادی توسط نفت خام اشباع شده بود. برای بررسی تغییرات ترشوندگی، زاویه‌ی تماس اندازه‌گیری شد. همچنین برای بررسی تأثیر این مواد بر مغزه‌ی آزمایشگاهی تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی و تصاویر فازی نیز، گرفته شدند. بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از محلول آب شور حاوی اکتیل‌پلی‌سولفون، مغزه‌ی آزمایشگاهی مورد استفاده را آب‌دوست می‌کند در حالی که استفاده از محلول آب شور حاوی تتراآلکیل‌آمونیم خاصیت ترشوندگی مغزه را به سمت نفت‌دوستی سوق خواهد داد. به طور خلاصه می‌توان گفت که مکانیزم‌های انجام گرفته بر مغزه در اثر استفاده از اکتیل‌پلی‌سولفون و تتراآلکیل‌آمونیم به ترتیب تمیز نمودن سطح و جذب سطحی سورفکتانت می‌باشد [۵].

در سال ۲۰۱۲ پردل شهری و همکارانش، از یک نوع سورفکتانت جدید به نام ساپونین در یک نمونه‌ی شکافدار استفاده کردند. این پژوهشگران غلظت بسیار پایینی از این ماده را به آب تزریقی به مخزن اضافه کردند که هدف از این کار تعدیل خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن و تبدیل آن از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست می‌باشد. سورفکتانت ساپونین از یک نوع برگ خاص که در مناطق خاورمیانه رشد می‌کند توسط فرآیند خشک کردن به صورت پاششی، استخراج می‌شود. استفاده از این ماده در میداین نفتی ایران به دلیل هزینه‌ی پایین و در دسترس بودن آن، می‌تواند به فرآیندی رایج تبدیل شود. در این بررسی برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی نفت-آب-ساپونین از روش قطره‌ی آویز استفاده شد در روش قطره‌ی آویزان یکی از فازها به شکل قطره در فضای فاز دیگر آویزان می‌گردد. مشخصات هندسی قطره که توسط عکسبرداری از آن و یک برنامه کامپیوتری بدست می‌آید، زاویه‌ی بین دو فاز را تعیین می‌نماید [۶].

۲- روش تحقیق

- مواد مورد استفاده در این پژوهش

۱) نفت خام

از نفت خام میدان نفتی بی‌بی‌حکیمه برای استفاده در این آزمایش‌ها، نمونه‌گیری به عمل آمد. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی آن از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب بدست آمد. در جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب ویژگی‌های نفت مصرفی و درصد اجزاء نفت خام ذکر شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های نفت مورد استفاده در آزمایش‌ها.

دانسیتته نفت (API)	گرانروی نفت (cp)	دمای مخزن (°F)	فشار مخزن (psi)
۲۶/۸	۲۲/۳	۲۳۵	۶۳۳۴

جدول (۲): درصد اجزاء نفت خام.

ترکیبات	C ₁	C _۲	C _۳	iC _۴	nC _۴	iC _۵	nC _۵	C _۶	C _{۷+}	H _۲ S	CO
درصد مولی	۱۸/۷	۴/۱۳	۴/۳۷	۱/۰۶	۲/۴۵	۲/۶۹۸	۳/۵۳	۵/۱۹	۴۹/۵۱	۴/۰۱۸	۴/۳۴۴

۲) آب دریا

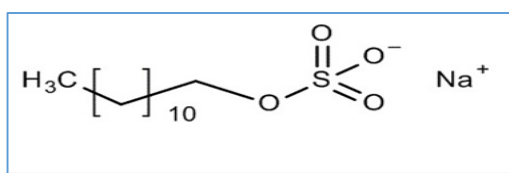
از آب خلیج فارس (بندر گناوه) به عنوان حلال سورفکتانت و انجام فرآیند سیلاب‌زنی استفاده شد.

۳) سورفکتانت

در این پژوهش از سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات (SDS) شرکت مرک آلمان در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm استفاده شده است که ساختار و برخی از ویژگی‌های آن در جدول (۳) و شکل (۱) آورده شده است.

جدول (۳): برخی از ویژگی‌های سورفکتانت‌های بکار رفته در این پژوهش

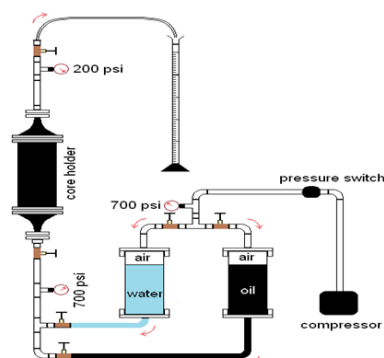
جامد	شکل ظاهری
$C_{12}H_{25}NaO_4S$	فرمول مولکولی
سفید	رنگ
۲۸۸/۴	جرم مولکولی (gr/mol)
$1/0.2 \pm 0/0.2$	دانسیته (gr/cc) در ۲۵ درجه سانتی گراد
سورفکتانت آنیونی	ماهیت یونی



شکل (۱): ساختار شیمیایی

– بررسی فرآیند تزریق سورفکتانت‌ها و پلیمر بر فرآیند سیلابزنی

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در فرآیند برداشت نفت از مخازن، دستگاهی طراحی و ساخته شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): دستگاه برای فرآیند سیلابزنی آبی

– انجام آزمایش سیلابزنی

پس از نصب تمام اتصالات و تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش و انباشتن core-holder با دانه‌های سیلیس و اشباع سازی محیط متخلخل با نفت، فشار core-holder را با استفاده از کمپرسور به ۱۵ bar رسانده شد. زمانی که فشار core-holder به ۱۵ bar رسید، فرآیند تزریق آب و سورفکتانت شروع شده که برای این کار در ابتدا مخزن آب به فشار ۱۵ bar رسانده شد تا فشار داخل core-holder و مخزن آب یکسان باشد تا جابجایی در اثر اختلاف فشار اتفاق نیفتد. در این زمان شیر ورودی core-holder باز شده تا ارتباط بین دو مخزن برقرار شود. به منظور نگه داشتن اختلاف فشار مناسب از شیر خروجی core-holder استفاده شد که پس از تنظیم، به مرور زمان آب و سورفکتانت به آرامی از فضای خالی بین دانه‌های سیلیس حرکت کرده و با جاروب کردن نفت موجود در فضاهای خالی، نفت به آرامی از core-holder خارج می‌شود. حجم نفت خارج شده از core-holder را با استفاده از بورتی که زیر شیر خروجی core-holder قرار گرفته بود، اندازه گیری شد و زمان متناسب با آن یادداشت گردید. پس از خارج شدن اولین قطرات آب شیر ورودی و ایجاد پدیده رسوخ آزمایش پایان یافته و شیر خروجی core-holder بسته

می‌شود. پس از پایان یافتن عمل تصویر برداری، از قسمت‌های مختلف core-holder نمونه گیری شد تا آزمایش SEM و ATR بر روی نمونه‌ها انجام شود.

۳- نتایج

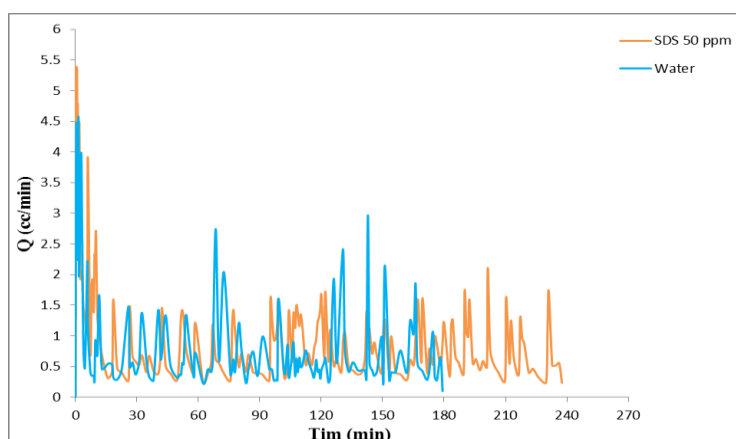
– اثر تزریق سورفکتانت آنیونی (SDS) بر میزان بازیافت نفت

همانطور اشاره شد، در زمان انجام آزمایش‌ها میزان حجم نفت برداشت شده از آزمایش‌ها در زمان‌های مختلف ثبت شد و نمودارهای دبی و درصد بازیافت نفت برای تزریق سورفکتانت در ادامه آورده شده است. لذا به عنوان مینا در مرحله اول از آب دریا در فرآیند تزریق به مخزن استفاده شده است. همچنین نمودارهای (۱) و (۲) دبی و درصد بازیافت نفت در زمان‌های مختلف برای سورفکتانت را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای بدست آوردن درصد بازیافت نفت از رابطه (۱) استفاده می‌کنیم.

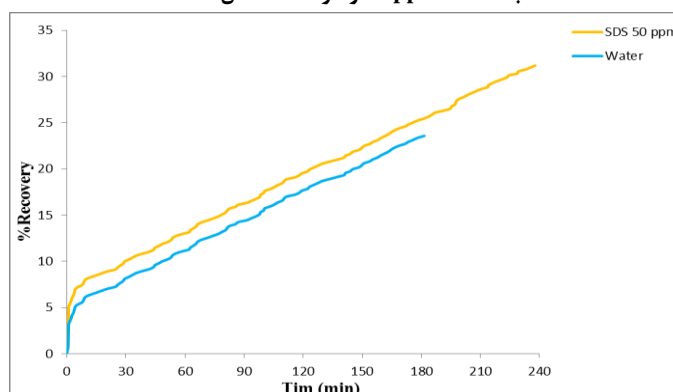
$$\% \text{Oil Recovery} = \quad (1)$$

$$\frac{\text{حجم نفت برداشت شده (cc)}}{\text{حجم کل مخزن} \times \% \epsilon} \times 100$$

که در این کار حجم کل مخزن ۱۲۹۹/۰۵۶ سی سی و تخلخل ۳۰ درصد می باشد.



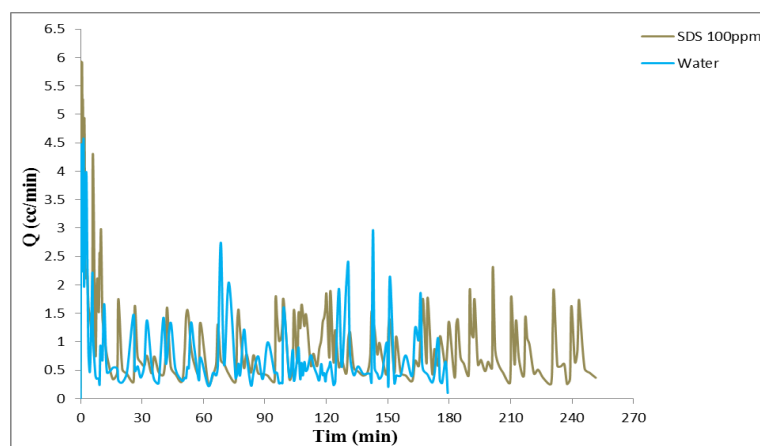
نمودار (۱): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪



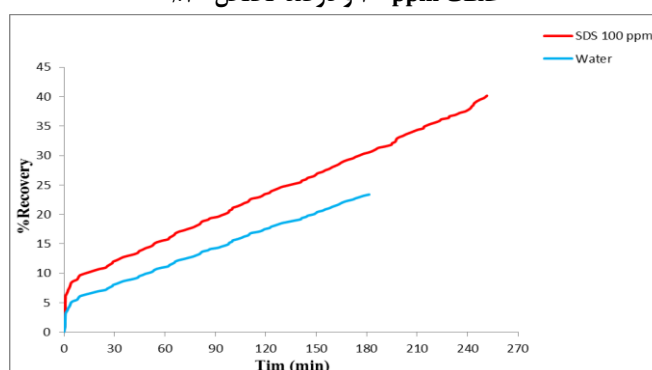
نمودار (۲): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

میزان برداشت نفت و درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا به مخزن ۹۰ سی سی و ۲۳ درصد می‌باشد در حالی که برای تزریق سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۵۰ ppm میزان برداشت نفت و درصد بازیافت نفت به ترتیب ۱۲۰/۵ سی سی و ۳۰/۹۷ درصد می‌باشد. همچنین زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ نیز ۲۳۵/۳۲ دقیقه بوده است. در این آزمایش درصد تخلخل ۳۰ درصد می‌باشد.

نمودار (۳) و (۴) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۰۰ ppm را نشان می‌دهد. همانند آزمایش قبل داده‌های حجم بر حسب زمان ثبت و نمودارهای دبی بر حسب زمان و درصد بازیافت نفت برای حالت تزریق آب دریا و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۰۰ ppm رسم شد که همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت سورفکتانت آنیونی درصد بازیافت نفت روند افزایشی دارد که می‌توان این توجیه را ارائه داد که با افزایش سورفکتانت آنیونی افزوده شده به آب دریا کشش سطحی بین نفت و سنگ مخزن کاهش می‌یابد که باعث افزایش ازدیاد برداشت نفت می‌شود. در این آزمایش مقدار نفت برداشت شده با تزریق آب ۹۰ سی سی و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۱۷۸/۱۵ دقیقه و برای سورفکتانت آنیونی ۱۵۶/۵ سی سی و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۵۱/۵۳۲ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز با اضافه نمودن سورفکتانت آنیونی به آب دریا ۴۰/۱۷ درصد بوده است. در این آزمایش درصد تخلخل ۳۰ می‌باشد.



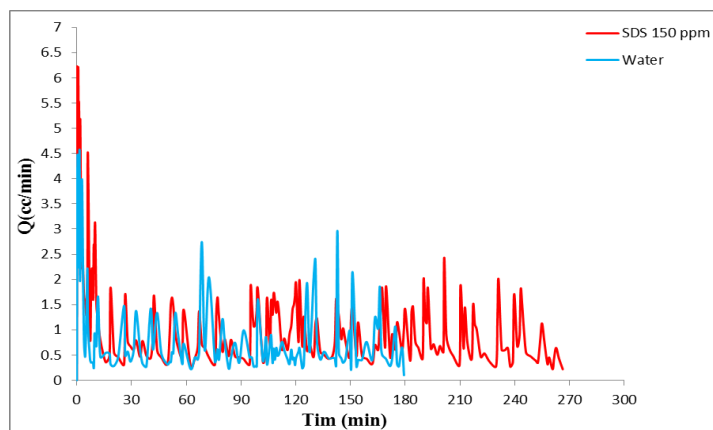
نمودار (۳): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪



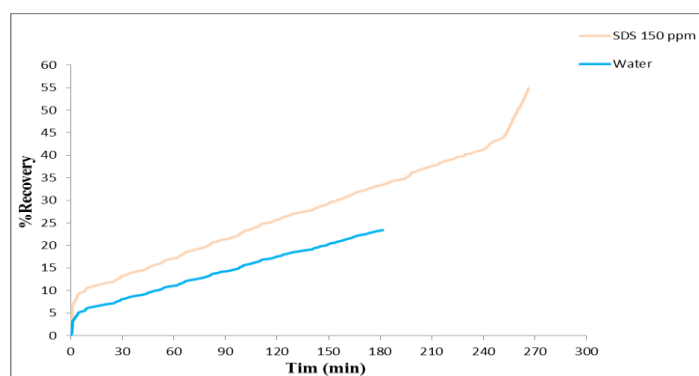
نمودار (۴): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

نمودارهای (۵) و (۶) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان و بازیافت نفت برای حالت تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۵۰ ppm را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت سورفکتانت آنیونی

روند میزان ازدیاد برداشت نفت روند یکنواخت‌تری نسبت به آب دریا دارد. میزان برداشت نفت در این شرایط برای تزریق آب ۹۰ سی‌سی و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۱۷۸/۱۵ دقیقه و درصد بازیافت نفت ۲۳ درصد و تزریق سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات ۲۱۰ سی‌سی و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۶۵/۳۲ دقیقه می‌باشد. همچنین درصد بازیافت نفت نیز در این شرایط ۵۳/۸۸ درصد بوده است. در این آزمایش درصد تخلخل ۳۰ درصد می‌باشد.



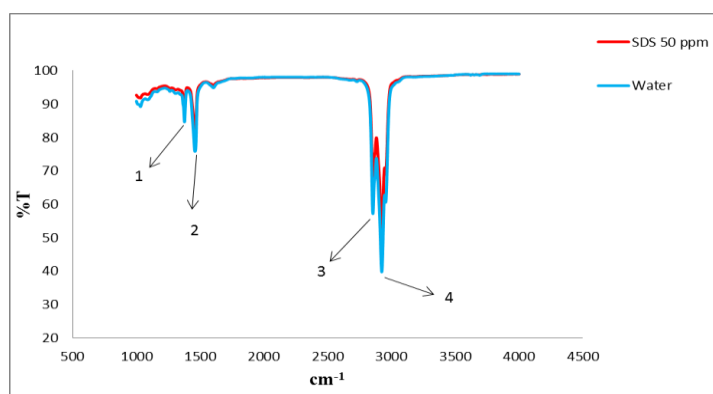
نمودار (۵): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪



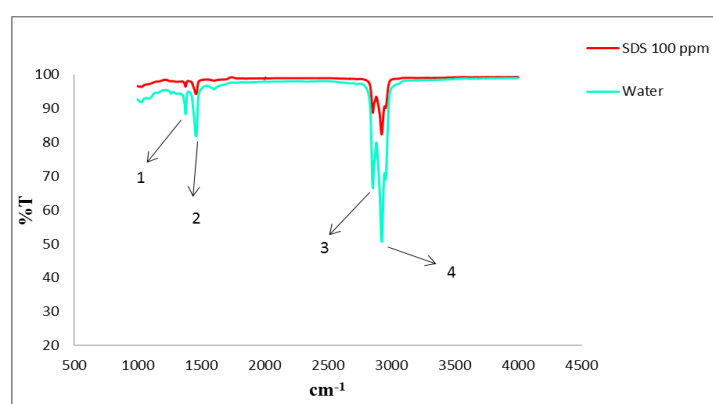
نمودار (۶): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت ۱۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

– بررسی طیف‌های بدست آمده از آنالیز ATR

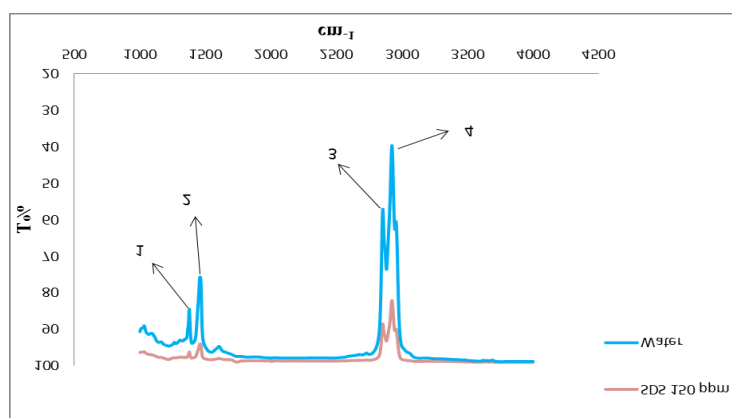
شکل‌های (۳) تا (۵) آنالیز ATR برای تزریق آب، سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات با غلظت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پیک‌های با شماره‌های ۱ و ۲ در کل شکل‌های ذکر شده مربوط به تست ATR بیانگر ترکیبات قطبی نفت و پیک‌های ۳ و ۴ مربوط به ترکیبات غیرقطبی نفت می‌باشند. با دقت در شکل و مقایسه‌ی غلظت‌های سورفکتانت آنیونی در هر آزمایش نسبت به تست تزریق آب می‌توان نتیجه گرفت با افزودن سورفکتانت به آب، پیک‌های موجود در نمودار ATR کاهش می‌یابد زیرا میزان ترکیبات قطبی و غیر قطبی نفت در آزمایش با ضریب برداشت بیشتر، به میزان بیشتری کاهش یافته است.



شکل (۳): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی با غلظت ۵۰ppm و تخلخل ۳۰٪



شکل (۴): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی با غلظت ۱۰۰ppm و تخلخل ۳۰٪



شکل (۵): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت آنیونی با غلظت ۱۵۰ppm و تخلخل ۳۰٪

نتیجه‌گیری

- اندازه‌گیری برداشت نفت در حالت تزریق آب، سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات نشان داد که با افزایش غلظت میزان بازیافت نفت می‌شود.
- با انجام فرآیند سیلابزنی و تزریق آب، سورفکتانت آنیونی درصد بازیافت نفت برای سورفکتانت روند افزایشی بیشتری دارد.
- بیشترین میزان برداشت نفت و درصد بازیافت نفت در شرایطی که سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۵۰ ppm بدست می‌آید. در این شرایط میزان برداشت نفت ۲۱۰ سی سی و درصد بازیافت نفت ۵۳/۸۸٪ می‌باشد.

- در غلظت‌های متفاوت سورفکتانت آنیونی میزان بازیافت نفت از مخزن افزایش یافته که تأثیر این مورد بر نمودار ATR کاهش طول پیک‌های قطبی و غیرقطبی نفت می‌باشد. علت کاهش طول پیک‌ها نیز، کاهش و حذف ترکیبات قطبی و غیرقطبی موجود در نفت مثل آسفالتین‌ها و پارافین‌ها می‌باشد. آب همراه با سورفکتانت ترکیبات قطبی نفت خام را شستشو داده و میزان این ترکیبات را در نفت به مقدار بسیار کمی می‌رساند که کاهش طول پیک‌های قطبی نیز به همین دلیل است.

مراجع

- [۱] تاری، فائزه، عطاپور، مهدی. (۱۳۹۱). کاربرد نانوفناوری در ازدیاد برداشت نفت و گاز، همایش کاربردهای فناوری نانو، نفت و گاز و پتروشیمی، صفحه ۳-۶.
- [۲] حیدری باغ عوضی، سمیرا، گلقدردشتی، حسن، عباسی، سعید، شهرآبادی، عباس. (۱۳۸۹). مطالعه سازگاری آب تزریقی و سازند در پروژه تزریق آب به یکی از مخازن نفتی ایران، اولین همایش ملی توسعه تکنولوژی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، صفحه ۱-۶.
- [3] K Wyatt, M. J Pitts, H Surkalo. (2002). Mature Water Floods Renew Oil Production by Alkaline-Surfactant- Polymer Flooding, *SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky*, pp. 32-37.
- [4] T Austad, S Strand, D. C Standnes. (2003). Spontaneous Imbibition of Aqueous Surfactant Solutions into Neutral to oil- wet Carbonate cores: Effects of Brine Salinity and Composition, *Energy and Fuels Journal*, 17, pp.1133-1144.
- [5] Seiedi, M Rahbar, M Nabipour, M.A Emadi, M.H Ghatee, S Ayatollahi. (2011). Atomic Force Microscopy (AFM) Investigation on the Surfactant Wettability Alteration Mechanism of Aged Mica Mineral Surfaces, *Energy and Fuels Journal*, 25, pp. 183-188.
- [6] M Pordel Shahri, S.R Shadizadeh, M Jamialahmadi. (2012). A New Type of Surfactant for Enhanced Oil Recovery, *Petroleum Science and Technology Journal*, 30, pp. 585-593.

شناسایی عوامل کلیدی و بررسی دقت پیش بینی مدل های داده کاوی در تصادفات ترافیکی محور زنجان-تبریز

بهزاد مسلم^{۱*}، فرزاد موحدی سبحانی^۲، عباس سقایی^۳

۱- کارشناسی ارشد، رشته مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

behzad.moslem@srbiau.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف شناسایی و بیان عوامل مهم و موثر بر تصادفات و کشف عملکرد تکنیک های داده کاوی در پیش بینی تصادفات ترافیکی در محور زنجان-تبریز مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف، مدل های انتخاب خصیصه مبتنی بر همبستگی، مبتنی بر یکپارچگی و مدل ارزیابی زیر مجموعه فیلتر شده برای انتخاب خصیصه بر اساس ۳ روش جستجوی حریصانه، روش جستجوی تابو و روش جستجوی ژنتیک جهت شناسایی و انتخاب بهترین خصیصه ها استفاده گردید. سپس از تکنیک های مختلف داده کاوی جهت بررسی دقت مدل ها در پیش بینی تصادفات استفاده گردید. به همین منظور ۶ مدل داده کاوی، درخت تصمیم گیری جی ۴۸، قوانین استنتاجی (پارت)، بیزین ساده، پرسپترون چندلایه، لجستیک، و کلاس بندی از طریق رگرسیون با استفاده از نرم افزار داده کاوی وکا مورد استفاده قرار گرفت. برای آزمون داده ها برای هر مدل از سه روش داده های تمرینی، اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و تقسیم درصدی با ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد آزمون استفاده گردید. پس از انجام محاسبات و ارزیابی های صورت گرفته نتایج نشان دادند که خصیصه های عامل تصادف، نوع برخورد، مانع دید، موقعیت تصادف، هندسه محل، عامل انسانی، علل اولیه، علل قبلی، علل مستقیم و تاریخ از مهمترین عوامل برای پیش بینی تصادفات ترافیکی در این محور هستند. همچنین نتایج نشان دادند که مدل های کلاس بندی از طریق رگرسیون، بیزین ساده و پرسپترون بهترین عملکردها را در پیش بینی تصادفات داشتند.

واژگان کلیدی: پیش بینی، تصادفات ترافیکی، داده کاوی، مدل سازی

۱- مقدمه

امروزه با افزایش روز افزون جمعیت در ایران و جهان، شاهد افزایش نیاز به تردد و جابه جایی افراد از مکانی به مکان دیگر هستیم. این تردها نیازمند ایجاد بستری ایمن و مناسب جهت حفظ جان انسان ها می باشد. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، تصادفات جاده ای یکی از بزرگترین عوامل مرگ و میر در جهان به شمار می آیند. در سال های اخیر به دلیل افزایش قابلیت جمع آوری و ذخیره داده ها، تحلیل و استخراج اطلاعات مفید از آن ها بدون استفاده از ابزارهای تحلیل پیشرفته داده ها به یک چالش تبدیل می شود. برای کمک به مدیران در انجام تصمیم گیری ها، مجموعه بزرگی از داده ها جمع آوری می شوند. شناسایی دلایل تصادفات از این مجموعه داده ها، کاری پیچیده است؛ چرا که رابطه پیچیده ای میان عوامل آن وجود دارد. اینجا جایی است که داده کاوی مورد توجه قرار می گیرد. داده کاوی، یک تکنیک نوظهور در تجزیه و تحلیل داده می باشد که فرآیند استخراج اطلاعات (قوانین و الگوها) ضمنی، غیربدیهی، از قبل ناشناخته و بالقوه مفید از داده ها را بر عهده دارد. پژوهش حاضر شکاف های تحقیقاتی در زمینه دقت و صحت روش های مورد استفاده و عدم مقایسه روش های مختلف به منظور انتخاب روشی مناسب تر جهت انجام کلاس بندی و کشف الگوهای مناسب از آن ها، و عدم ارائه قوانینی جامع و قوانین پنهان در حوزه تصادفات جاده ای با

استفاده از روش‌های داده کاوی را پیدا کرد. بنابراین هدف و تکیه خود را به شناسایی عوامل دخیل در تصادفات و سپس مقایسه میان مدل‌های مختلف داده کاوی قرار داده است.

۲- پیشینه پژوهش

تامنه و همکارانش به بررسی تصادفات ترافیکی و یافتن دلایل آن با توجه به مشخصات رانندگان، جاده و تصادفات پرداختند. آن‌ها با بررسی ۵۹۷۳ مورد اطلاعات تصادفات در شهر ابوظبی امارات در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳ با استفاده از روش‌های مختلف داده کاوی و استفاده از الگوریتم‌های مختلف کلاس‌بندی همچون درخت تصمیم‌گیری، قوانین استنتاجی، شبکه‌های عصبی و چندین روش دیگر به دنبال یافتن عوامل موثر بر تصادفات بودند. برای رسیدن به این نتایج از نرم افزار داده کاوی وکا استفاده شده است. اثربخشی هر روش در پیش بینی شدت حوادث در سه روش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که دقت کلی روش درخت تصمیم، روش قوانین استنتاجی و روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه در پیش بینی شدت آسیب ناشی از تصادفات رانندگی، با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع ۱۰گانه مشابه است. و دقت پایینی برای روش بیزین ساده مشاهده شد [Taamneh, et al., 2017: 146-166].

ماسونه و همکارانش به تجزیه و تحلیل عوامل موثر بر شدت تصادفات در تقاطعات جاده‌های شهری پرداختند. تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از مدل شبکه عصبی برگشتی و یک مدل ترکیبی خطی تعمیم یافته انجام شد که امکان سنجی تأثیر جریان و دیگر متغیرها را فراهم می‌کند. هر دو روش نشان می‌دهد که جریان‌ها در پیش‌بینی سطوح شدت نقش دارند. متأسفانه مجموعه متغیرهای انتخاب شده اقدامات خاصی برای کاهش شدت تصادف را انجام نمی‌دهد [Mussone, et al., 2017: 112-122].

کاسترو و کیم به بررسی داده کاوی در مورد ایمنی جاده‌ها پرداختند. ایشان ارزیابی عامل‌های موثر در حوادث خودرو را با استفاده از مدل‌های کلاس بندی مد نظر قرار دادند. در این مطالعه، از سه مدل طبقه بندی داده کاوی برای شناسایی عوامل با بیشترین تأثیر در حوادث خودرو استفاده شده است. نتایج ارزیابی و بحث نشان دادند که سه عامل شرایط نور، مانور وسیله نقلیه و نوع جاده مؤثرترین و پر تکرارترین عوامل بودند. تحقیقات همچنین نشان دادند که سن خودرو و شرایط آب و هوایی هیچ تأثیری بر میزان آسیب نداشتند [Castro and Kim, 2016: 104-111].

دی‌اونا و همکارانش، به تجزیه و تحلیل شدت جراحات تصادفات ترافیکی در بزرگراه‌های برون شهری اسپانیا با استفاده از شبکه‌های بیزی پرداختند. چندین عامل مختلف به شدت تصادفات در حوادث، مانند ویژگی‌های راننده، ویژگی‌های بزرگراهی، ویژگی‌های وسایل نقلیه، ویژگی‌های تصادف و عوامل آب و هوایی، کمک می‌کند. نتایج به دست آمده برای شاخص‌های این پژوهش به طور معنی داری در محدوده مطالعات قبلی بررسی شده توسط این پژوهش قرار دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های بیزین یک ابزار مفید برای طبقه بندی حوادث ترافیکی با توجه به شدت تصادفات آنها باشد [de Oña, et al., 2011: 402-411].

چانگ و وانگ به بررسی و تحلیل شدت تصادفات ترافیکی براساس تکنیک درخت کلاس بندی غیر پارامتریک پرداختند. ایشان در ادامه بیان داشتند که، مدل‌های رگرسیون آماری، مانند مدل‌های لوجیت با مدل‌های دستوری پروبیت - لوجیت، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا شدت آسیب‌های ناشی از تصادفات را بررسی کنند. در این پژوهش، مساله پنج کلاس پیش‌بینی به مجموعه‌ای از مدل‌های پیش‌بینی باینری با استفاده از نمونه‌ای ۳۰۳۵۸ تجزیه می‌شود و روابط بین عوامل مرتبط با تصادفات و سطوح مختلف آسیب بررسی می‌شود. نتایج، نسبت بین تغییرات مهم عوامل تصادفات با تغییر سطح شدت آسیب دیدگی را ارائه می‌دهند [Chang and Wang, 2006: 1019-1027].

بشارتی و توکلی کاشانی، به بررسی عوامل موثر در ایجاد خطر تصادفات رانندگان اتوبوس‌های بین شهری پرداخته‌اند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر عوامل جمعیت شناختی، محیطی، شغلی و ویژگی‌های رفتاری رانندگان اتوبوس‌های بین شهری بر ریسک تصادفات است. ایشان از مدل رگرسیون لجستیک بهره بردند. نتایج مدل همچنین نشان می‌دهد که رصد خطرات، مستعد خستگی و جستجوی هیجان می‌تواند بعنوان پیش‌بینی کننده‌های دیگر خطرات منجر به تصادف در نظر گرفته شود [Besharati and Tavakoli Kashani, 2017: 1-8].

انوری و همکارانش به شناسایی مهمترین عوامل در احتمال مقصر بودن موتورسیکلت سواران توسط داده کاوی با استفاده از مدل‌های درخت کلاس بندی پرداختند. ایشان داده‌هایی از ایران را که در سال ۲۰۱۱ از پلیس دریافت کرده بودند با استفاده از

مدل درخت کلاس‌بندی و رگرسیون تحلیل کرده و به تعیین عوامل مقصر بودن یا نبودن موتورسوار در تصادف پرداختند. نتایج نشان داد که نوع تصادف و سن راننده در احتمال مقصر بودن موثر بود. همچنین تصادف جلو به عقب بیشترین میزان تصادف در این زمینه را دارا بود. در نهایت پیشنهاد آموزش بیشتر به رانندگان و نصب علائم هشدار دهنده ارائه گردیده بود [Anvari, et al., 2017: 653-662].

توکلی کاشانی و همکارانش به بررسی یک روش داده کاوی به منظور بررسی عوامل موثر بر شدت تصادفات مسافران موتور سیکلت پرداختند. این پژوهش عوامل اصلی کاهش شدت تصادفات این گروه از کاربران جاده را مورد بررسی قرار داد. روش طبقه بندی و رگرسیون (کارت) برای تجزیه و تحلیل شدت آسیب پذیری مسافران موتورسیکلت در ایران در یک دوره ۴ ساله مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که نوع منطقه، زمین مورد استفاده و بخش زخمی بدن (سر، گردن و غیره) عوامل مؤثر بر مرگ و میر مسافران موتور سیکلت هستند. نتایج همچنین نشان می دهد که استفاده از کلاه ایمنی می تواند خطر مرگ و میر در میان مسافران موتور سیکلت را تا ۲۸ درصد کاهش دهد [Tavakoli Kashani, et al., 2014: 93-98].

پراتی و همکارانش، با استفاده از تکنیک‌های داده کاوی اقدام به پیش بینی شدت تصادفات دوچرخه‌ها در کشور ایتالیا با توجه به داده‌های رسمی منتشر شده کردند. ایشان از داده‌های ارائه شده توسط موسسه ملی آمار ایتالیا در مورد تصادفات جاده‌ای که در شبکه جاده‌ای ایتالیا از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۱۳ رخ داده است استفاده کردند. ایشان از دو مورد تکنیک داده کاوی درخت تصمیم‌گیری چاید و تجزیه و تحلیل شبکه بیزین به طور گسترده‌ای استفاده کردند تجزیه و تحلیل چاید نشان داد که مهم ترین پیش بینی‌ها، نوع جاده، نوع تصادف، سن دوچرخه سوار، علائم جاده، جنسیت دوچرخه سوار، نوع خودرو مقابل، ماه و نوع جاده بودند. این هشت پیش بینی کننده مهم در شدت تصادفات دوچرخه به عنوان پیش بینی کننده هدف در تجزیه و تحلیل شبکه بیزین استفاده شد. تجزیه و تحلیل شبکه بیزین نوع تصادف، نوع جاده و نوع وسیله نقلیه مقابل را به عنوان مهمترین عوامل پیش بینی کننده شدت تصادفات دوچرخه‌ها شناسایی کرد [Prati, et al., 2017: 44-54].

کومار و توشنیوال، به تجزیه و تحلیل تصادفات ترافیکی وسایل نقلیه با دو چرخ، در هند پرداختند. هدف از این مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌های تصادفات جاده‌ای ایالت اوتاراخاند در هندوستان است و فاکتورهایی را که بر شدت این حوادث در مناطق مختلف اوتاراخاند تأثیر می‌گذارد را بررسی می‌کند. در ابتدا، ایشان سه الگوریتم طبقه بندی محبوب یعنی درخت تصمیم‌گیری کلاس‌بندی و رگرسیون، بیزین ساده و بردار حمایت ماشینی در مجموعه داده‌های تصادفات وسایل نقلیه با دو چرخ را مقایسه کردند. تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های کل نشان داد که تمام ویژگی‌های تصادفات به غیر ویژگی ماه در تصادفات کشته و یا به شدت مجروح در ایالت اوتاراخاند درگیر بودند. همچنین دقت طبقه بندی الگوریتم درخت تصمیم‌گیری بهتر از دو تکنیک دیگر بود. از این رو، الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را ترجیح دادند تا فاکتورهایی را که بر شدت حوادث وسایل نقلیه با دو چرخ در کل استان اوتاراخاند و ۱۳ ناحیه آن به طور جداگانه تأثیر می‌گذارد، استخراج کنند [Kumar and Toshniwal, 2017].

۳- روش شناسی پژوهش

این پژوهش با اهداف شناسایی و بیان عوامل مهم و موثر بر تصادفات و کشف عملکرد تکنیک‌های داده کاوی در پیش‌بینی تصادفات ترافیکی در ایران مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف این پژوهش از تکنیک‌های مختلف داده کاوی استفاده گردید. به همین منظور ۶ مدل داده کاوی، درخت تصمیم‌گیری جی ۴۸، قوانین استنتاجی (پارت)، بیزین ساده، پرسپترون چندلایه، لجیستیک، و کلاس‌بندی از طریق رگرسیون با استفاده از نرم افزار داده کاوی و کا مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف این پژوهش از روش‌های مدل ارزیابی انتخاب خصیصه مبتنی بر همبستگی، مدل انتخاب خصیصه مبتنی بر یکپارچگی و مدل ارزیابی زیر مجموعه فیلتر شده برای انتخاب خصیصه بر اساس ۳ روش جستجوی حریصانه، روش جستجوی تابو و روش جستجوی ژنتیک جهت شناسایی و انتخاب بهترین خصیصه‌ها استفاده گردید.

۳-۱- تعریف مدل‌ها

در این بخش برای مدل‌های مورد بررسی تعریف کوتاهی ارائه شده است.

- درخت تصمیم‌گیری جی ۱۴۸^۱: درخت‌های تصمیم‌گیری از طریق جداسازی متوالی داده‌ها به گروه‌های مجزا ساخته می‌شوند و هدف در این فرآیند افزایش فاصله بین گروه‌ها در هر جداسازی است. هر گره داخلی در این درخت‌ها یکی از متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد و دارای تعداد شاخه‌ای برابر با تعداد مقادیر ممکن است که متغیر ورودی است. هر گره برگ دارای مقدار مشخصه هدف است [Taamneh, et al., 2017: 146-166].
- قوانین استنتاجی (پارت)^۲: این روش یک فرآیند تکرار شونده است که رویکرد تقسیم و تسخیر را دنبال می‌کند. در این روش در هر تکرار، یک زیر مجموعه از مجموعه داده‌های آموزش با استفاده از یکی از الگوریتم‌های درخت تصمیم‌گیری برای تولید قوانین استفاده می‌شود [Han, et al., 2011].
- بیزین ساده^۳: بیزین ساده، یک الگوریتم طبقه‌بندی بر اساس قضیه بیزین است، با فرض ساده‌ای که هر دو متغیر ورودی مستقل است. اگر چه این فرض بیش از حد ساده شده است اما به همین صورت، این الگوریتم به طور موثر در بسیاری از مشکلات پیچیده در دنیای واقعی به خصوص طبقه‌بندی استفاده می‌شود [Taamneh, et al., 2017: 146-166].
- شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۴: این روش یک تکنیک یادگیری تحت نظارت است که برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. پرسپترون چند لایه، یک شبکه عصبی مصنوعی ایجاد می‌کند که متشکل از گره‌های چندگانه در سه یا چند لایه (لایه ورودی، لایه خروجی و یک یا چند لایه پنهان) است. متغیرهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی با استفاده از یک یا چند لایه پنهان نگاشت می‌شوند. در نتیجه استفاده از یک الگوریتم انتشار پس‌رو در آموزش شبکه‌های تولید شده توسط پرسپترون چندلایه، با موفقیت برای حل بسیاری از مشکلات دشوار مورد استفاده قرار می‌گیرد. پرسپترون چند لایه دارای قابلیت جداسازی داده‌هایی است که به صورت خطی قابل جدا شدن نیستند [Kantardzic, 2011].
- رگرسیون لجستیک^۵: رگرسیون لجستیک، یک مدل آماری رگرسیون برای متغیرهای وابسته دوسویی است. این مدل را می‌توان به عنوان مدل خطی تعمیم‌یافته‌ای که از تابع لجیت به عنوان تابع پیوند استفاده می‌کند و خطایش از توزیع چندجمله‌ای پیروی می‌کند، به حساب آورد [Besharati and Tavakoli Kashani, 2017: 1-8].
- کلاس بندی از طریق رگرسیون^۶: درختان طبقه بندی و رگرسیون، روش‌های یادگیری ماشین برای ساخت مدل‌های پیش بینی از داده‌ها هستند. این مدل‌ها توسط تقسیم بندی بازگشتی فضای داده‌ها و تخصیص یک مدل پیش‌بینی ساده در هر پارتیشن بهینه شده اند. درختان رگرسیون برای متغیرهای وابسته هستند که مقادیر مستقل یا دستورالعمل را با خطای پیش بینی، معمولاً با تفاوت مربع بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده اندازه گیری می‌کنند [Loh, 2011: 14-23].

۳-۲- تعریف جامعه آماری

برای انجام پژوهش حاضر نیازمند جمع آوری اطلاعات و داده‌های تصادفات ترافیکی به جهت بررسی و ارزیابی مدل پیشنهادی می‌باشیم. به همین منظور با همکاری سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده ای ایران، داده‌های تصادفات ترافیکی زنجان-تبریز که مربوط به سال‌های ۸۹ تا ۹۲ خورشیدی (۲۰۱۰-۲۰۱۳ میلادی) است، جمع آوری گردید. این مجموعه داده، شامل ۱۱۷۰ رکورد تصادفات ترافیکی در دوره نزدیک به چهار سال است.

۳-۳- پیش پردازش مجموعه داده

پیش از انجام عملیات داده‌کاوی و ارائه مدل‌ها، نیازمند بررسی داده‌های موجود، پاکسازی و پیش پردازش اولیه هستیم. داده‌های تحویل گرفته شده از سوی سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده به صورت فایل‌های پایگاه داده مجزا از یکدیگر بر اساس هر

¹ Decesion Tree J48

² Rule Induction (PART)

³ Naïve Bayesian

⁴ Multilayer Perceptron (MLP)

⁵ Logistic Regression

⁶ Classification via Regression

سال بودند. به همین روی در مرحله نخست برای هر هر محور عبوری یک مجموعه پایگاه داده از تجمیع داده های موجود هر کدام ایجاد گردید. پس از تجمیع برای هر یک از مجموعه ها، داده ها تجمیع شده دارای ۵۷ ستون خصیصه بود که به ازای هر ستون خصیصه یک کد کارشناسی که غیرقابل تحلیل بود در ستون مجاور آن قرار داشت. بنابراین ستون های کد کارشناسی در گام دوم حذف گردیدند. پس از آن در گام سوم ستون های بدون هیچگونه داده از مجموعه حذف گردیدند. در گام چهارم داده های دارای نویز و غیرقابل اعتماد که محتوای واقعی آن بر اساس داده های سایرین مشخص نبود و مشخصا به اشتباه در ستون یاد شده وارد شده بودند حذف گردیدند. در گام پنجم داده های گمشده در مجموعه داده ها، توسط الگوریتم جایگذاری مقادیر گمشده که یک الگوریتم بدون ناظر است، تکمیل گردید. این الگوریتم همه مقادیر گمشده برای خصوصیت های کمی و کیفی در مجموعه داده ها را با میانه و میانگین گیری از داده های تمرینی تکمیل می کند. بر اساس عملیات پیش پردازش فوق مجموع خصیصه های قابل اتکا و مناسب ۲۴ مورد گردید.

۳-۴- روش شناسی پژوهش

برای دستیابی به اهداف این پژوهش از تکنیک های مختلف داده کاوی استفاده گردید. به همین منظور نخست نیازمند انتخاب خصیصه های مناسب برای محور زنجار-تبریز می باشیم. به همین روی به ترتیب از ۳ مدل انتخاب خصیصه استفاده شد. مدل انتخاب ویژگی مبتنی بر همبستگی^۱ (CFS)، انتخاب متغیر مبتنی بر یکپارچگی (CSE)^۲ و مدل ارزیابی زیر مجموعه فیلتر شده (FSE)^۳ بر اساس ۳ روش جستجوی حریصانه^۴ که یک جستجوی پسرانه را از طریق خصوصیات زیر مجموعه ها انجام می دهد، روش جستجوی تابو^۵ که جستجو را از طریق فضای زیر مجموعه ها انجام می دهد و روش جستجوی ژنتیک^۶ که جستجو را بر اساس یک الگوریتم ژنتیک در خصوصیت ها انجام می دهد. پس از انتخاب خصیصه ها، ۶ مدل داده کاوی، درخت تصمیم گیری جی ۴۸، قوانین استنتاجی (پارت)، بیزین ساده، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، لجستیک، و کلاس بندی از طریق رگرسیون که هر یک از نوع متفاوتی است انتخاب گردید تا علاوه بر انتخاب روش های مختلف انواع مختلف مدل ها نیز مورد بررسی جامع قرار گیرد. سپس هر یک از مدل های پیشنهادی را برای هر یک از مجموعه داده ها، به سه روش مورد ارزیابی قرار می دهیم. نخست برای هر مدل از روش داده های تمرینی استفاده می کنیم. این روش به سبب بررسی اولیه از میزان دقت هر یک از مدل ها بر اساس مجموعه داده های مورد ارزیابی است. سپس از روش اعتبارسنجی متقاطع با انتخاب ۱۰ زیر مجموعه استفاده گردید. این روش به سبب بررسی این موضوع است که با افزایش داده ها چه تاثیری در نتایج حاصل خواهد شد. با انتخاب ۱۰ زیر مجموعه شدن، هر مجموعه داده به ۱۰ قسمت تقسیم شده و در هر مرحله یک قسمت با سایرین مقایسه می شود، که نوعی شبیه سازی از ۱۰ برابر شدن داده ها است. در نهایت از روش تقسیم درصدی استفاده شد. این روش داده ها را به دو مجموعه داده های تمرینی و داده های آزمون تقسیم بندی می کند. مدل بر اساس داده های تمرینی ایجاد می گردد و سپس توسط داده های آزمون که دیده نشده است مورد آزمون قرار می گیرد تا عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گیرد. بر همین اساس از روش تقسیم درصدی با تخصیص ۷۰ درصد به داده های تست جهت مدل سازی و ۳۰ درصد به داده های آزمون جهت ارزیابی مدل، استفاده گردید. نتایج هر یک از این روش ها برای هر یک از مدل ها و برای هر چهار مجموعه داده محاسبه گردید و با یکدیگر مورد ارزیابی و مقایسه قرار خواهند گرفت. کلیه مراحل پیش پردازش، انتخاب خصیصه ها، انتخاب مدل ها، پردازش آنها و دریافت نتایج توسط نرم افزار داده کاوی وکا مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۵- روش ارزیابی مدل

^۱ Correlation-based Feature Selection (CFS)

^۲ Consistency Subset Evaluation (CSE)

^۳ Filtered Subset Evaluator (FSE)

^۴ Greedy Stepwise Search Algorithm

^۵ Tabu Search Algorithm

^۶ Genetic Search Algorithm

- عملکرد مدل کلاس بندی شده توسط یک ماتریس درهم ریختگی^۱ تعریف می‌شود که نمونه‌های درست و نادرست کلاس‌بندی را برای هر کلاس نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌هایی که برای ارزیابی عملکرد یک کلاس‌بندی نیاز است توسط ماتریس درهم ریختگی محاسبه می‌شوند. جدول ۱ این ماتریس را نشان می‌دهد. این ماتریس دارای ۴ مقدار زیر است:
- درست-مثبت (TP)^۲: نمونه‌هایی که درست هستند و به عنوان درست کلاس‌بندی شده‌اند. این مقدار بیانگر میزان موفقیت پیش‌بینی است.
 - درست-منفی (TN)^۳: نمونه‌هایی که درست هستند و به عنوان اشتباه کلاس‌بندی شده‌اند. این مقدار بیانگر به طور صحیح مردود شده است.
 - اشتباه-مثبت (FP)^۴: نمونه‌هایی که اشتباه هستند و به عنوان درست کلاس‌بندی شده‌اند. این مقدار بیانگر یک هشدار غلط است یا به بیان دیگر بیانگر خطای نوع ۱ است.
 - اشتباه-منفی (FN)^۵: نمونه‌هایی که اشتباه هستند و به عنوان اشتباه کلاس‌بندی شده‌اند. این مقدار بیانگر مقادیر از دست رفته یا به بیان دیگر بیانگر خطای نوع ۲ است.

جدول ۱- ماتریس درهم ریختگی

پیش‌بینی			
منفی	مثبت		
اشتباه-منفی (FN)	درست-مثبت (TP)	مثبت	مشاهدات
درست-منفی (TN)	اشتباه-مثبت (FP)	منفی	

شاخص‌های نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت اشتباه برای اساس ماتریس درهم ریختگی به ترتیب از طریق فرمول‌های ۱ و ۲ محاسبه شده و برای محاسبه شاخص نمودار منحنی عملکرد سیستم در ادامه استفاده می‌شوند.

$$True\ Positive\ Rate\ (TPR) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۱)$$

$$False\ Positive\ Rate\ (FPR) = \frac{FP}{FP + TN} \quad (۲)$$

شاخص دیگری که مورد ارزیابی قرار می‌گیرد منحنی عملکرد سیستم^۶ است که محورهای آن را نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت اشتباه تشکیل می‌دهند. برای رسم نمودار، مقادیر نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت اشتباه، نقاط برش بین ۰ و ۱ را محاسبه می‌کنند. سپس منحنی بر روی نقاط محاسبه شده برازش داده می‌شود. ناحیه زیر منحنی بین ۰/۵ تا ۱ است و بر همین اساس می‌توان عملکرد مدل‌ها را مورد توجه قرار داد. اگر ناحیه زیر منحنی بزرگتر از ۰/۹ باشد یک مدل بسیار عالی داریم. اگر ناحیه بین ۰/۸ تا ۰/۹ باشد با یک مدل خوب مواجه هستیم و اگر بین ۰/۷ و ۰/۸ باشد با یک مدل قابل قبول روبرو هستیم.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- شناسایی عوامل و انتخاب خصیصه‌ها

^۱ confusion matrix

^۲ True Positive (TP)

^۳ True Negative (TN)

^۴ False Positive (FP)

^۵ False Negative (FN)

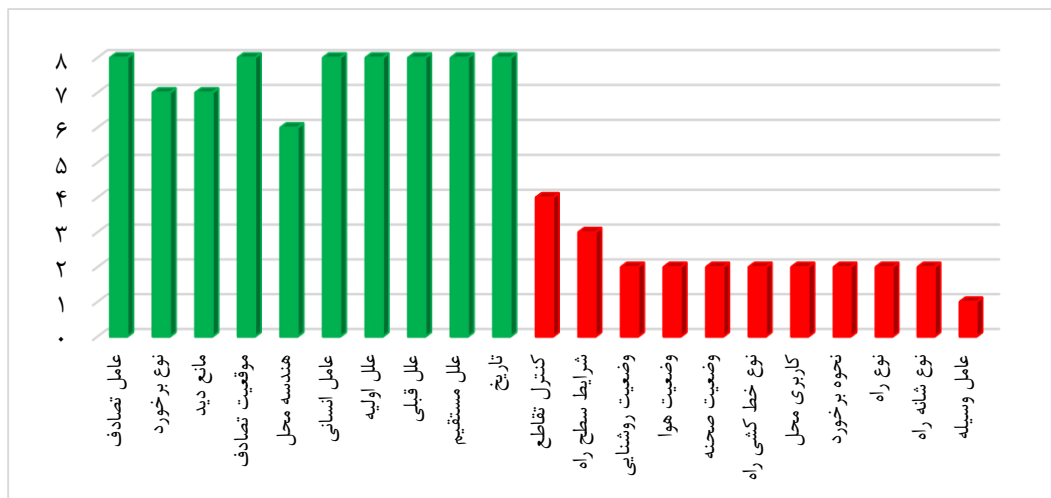
^۶ Receiver Operating Curve (ROC)

برای مجموعه داده زنجان- تبریز سه مدل انتخاب ویژگی مبتنی بر همبستگی (CFS)، انتخاب متغیر مبتنی بر یکپارچگی (CSE) و مدل ارزیابی زیر مجموعه فیلتر شده (FSE) را بر اساس ۳ روش جستجوی حریصانه، روش جستجوی تابو و روش جستجوی ژنتیک مورد آزمون قرار دادیم. پس از انجام آزمایش مشخص گردید انتخاب متغیر مبتنی بر یکپارچگی (CSE) با استفاده از الگوریتم تابو نتیجه ای از آن حاصل نمی شود. برای ارزیابی این مدل ها بیان شد که خصیصه هایی را که در نصف به اضافه یک مورد از مدل ها، مورد ارزیابی هستند به عنوان خصیصه برگزیده انتخاب خواهند شد. براساس مجموعه داده های زنجان - تبریز برای مدل های ارزیابی خصیصه نتایج مطابق با جدول ۲ به دست آمد.

جدول ۲- میزان تکرار خصیصه ها بر اساس روش های بیان شده

تعداد تکرار	خصیصه
۸	عامل تصادف
۷	نوع برخورد
۷	مانع دید
۸	موقعیت تصادف
۶	هندسه محل
۸	عامل انسانی
۸	علل اولیه
۸	علل قبلی
۸	علل مستقیم
۸	تاریخ
۴	کنترل تقاطع
۳	شرایط سطح راه
۲	وضعیت روشنایی
۲	وضعیت هوا
۲	وضعیت صحنه
۲	نوع خط کشی راه
۲	کاربری محل
۲	نحوه برخورد
۲	نوع راه
۲	نوع شانه راه
۱	عامل وسیله

بر همین اساس می توان مطابق با جدول و نتایج فوق نمودار را ترسیم کرد که عوامل منتخب را نشان می دهد. خصیصه های انتخاب شده بر اساس معیار ارزیابی با رنگ سبز مشخص شده اند. این معیارهای منتخب به عنوان ورودی در مدل های داده کاوی استفاده شدند.



نمودار ۱- خصیصه های منتخب برای مجموعه داده های زنجان-تبریز

۲-۴- تجزیه و تحلیل داده های محور زنجان - تبریز

نتایج حاصل از بررسی داده‌های زنجان-تبریز توسط ۶ مدل داده کاوی جی ۴۸، پارت، بیزین ساده، پرسپترون چندلایه، لجستیک و طبقه‌بندی از طریق رگرسیون به ترتیب در زیر آورده شده است.

مدل جی ۴۸

نتایج حاصل از اجرای مدل داده کاوی جی ۴۸ بر روی داده‌های زنجان-تبریز در زیر آورده شده است. همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ماتریس درهم ریختگی برای این مدل با روش داده‌های تمرینی برای سه کلاس خسارتی، جرحی و فوتی به دست آمد.

جدول ۳- ماتریس درهم ریختگی مدل جی ۴۸ با روش داده های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۷۵	۲	۱۰
فوتی	۲۳	۱۶	۲
جرحی	۸۰	۴	۵۸

پس از آن شاخص‌های دیگر ارزیابی مدل برای داده‌های زنجان-تبریز با روش داده‌های تمرینی محاسبه گردید، که در جدول ۴ آمده‌اند.

جدول ۴- شاخص های ارزیابی مدل جی ۴۸ با روش داده های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۸۸	۰/۵۶۳	۰/۹۳۴	تمرین:
فوتی	۰/۳۹۰	۰/۰۰۵	۰/۹۵۸	۰/۵
جرحی	۰/۴۰۸	۰/۰۱۲	۰/۹۳۳	آزمون:
میانگین وزن‌ها	۰/۸۹۷	۰/۴۷۶	۰/۹۳۵	۰/۰

سپس داده های زنجان-تبریز را با روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه، مورد محاسبه و بررسی قرار می دهیم. نتایج ماتریس درهم ریختگی حاصل از این محاسبه در جدول ۵ در زیر آورده شده است.

جدول ۵- ماتریس درهم ریختگی مدل جی ۴۸ با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۵۲	۶	۲۹
فوتی	۳۲	۴	۵
جرحی	۱۰۶	۷	۲۹

در ادامه سایر شاخص های ارزیابی مدل برای داده های زنجان-تبریز با روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه محاسبه گردید، که در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- شاخص های ارزیابی مدل جی ۴۸ با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۶۵	۰/۷۵۴	۰/۸۳۶	تمرین: ۰/۴۷
فوتی	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲	۰/۶۴۲	
جرحی	۰/۲۰۴	۰/۰۳۳	۰/۸۰۸	
میانگین وزن ها	۰/۸۴۲	۰/۶۴۱	۰/۸۲۶	

در نهایت مدل جی ۴۸ با داده های زنجان-تبریز برای روش تقسیم درصدی با ۷۰ درصد تمرین و ۳۰ درصد آزمون محاسبه گردید. ماتریس درهم ریختگی به دست آمده در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- ماتریس درهم ریختگی مدل جی ۴۸ با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۸۴	۷	۱۶
فوتی	۵	۲	۰
جرحی	۲۲	۴	۱۱

در جدول ۸ سایر شاخص های محاسبه شده برای داده های زنجان-تبریز با روش تقسیم درصدی برای مدل جی ۴۸ آورده شده است.

جدول ۸- شاخص های ارزیابی مدل جی ۴۸ با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۲۵	۰/۶۱۴	۰/۸۲۲	تمرین: ۰/۳۹
فوتی	۰/۲۸۶	۰/۰۳۲	۰/۶۵۶	
جرحی	۰/۲۹۷	۰/۰۵۱	۰/۸۲۹	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن ها	۰/۸۴۶	۰/۵۴۳	۰/۸۱۹	

مدل پارت

نتایج حاصل از اجرای مدل داده کلوی پارت بر روی داده های زنجان-تبریز در زیر آورده شده است. در ابتدا ماتریس درهم ریختگی برای این مدل با روش داده های تمرینی برای سه کلاس خسارتی، جرحی و فوتی به دست آمد، که در جدول ۹ مشاهده می شود.

جدول ۹- ماتریس درهم ریختگی مدل پارت با روش داده های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۶۷	۱	۱۹
فوتی	۲۲	۱۶	۳
جرحی	۷۶	۵	۶۱

سایر شاخص ها بر اساس این مدل برای داده های تمرینی در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰- شاخص های ارزیابی مدل پارت با روش داده های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۸۰	۰/۵۳۶	۰/۹۲۹	تمرین: ۰/۳
فوتی	۰/۳۹۰	۰/۰۰۵	۰/۹۳۸	
جرحی	۰/۴۳۰	۰/۰۲۱	۰/۹۲۶	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن ها	۰/۸۹۲	۰/۴۵۵	۰/۹۲۹	

سپس مدل را با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه مورد بررسی قرار دادیم. ماتریس درهم ریختگی حاصل از روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱- ماتریس درهم ریختگی مدل پارت با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۴۶	۹	۳۲
فوتی	۳۴	۴	۳
جرحی	۹۸	۶	۳۸

سایر شاخص های به دست آمده برای این روش مطابق با جدول ۱۲ در زیر آورده شده است.

جدول ۱۲- شاخص های ارزیابی مدل پارت با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۵۸	۰/۷۲۱	۰/۸۲۹	تمرین: ۰/۲۸
فوتی	۰/۰۹۸	۰/۰۱۳	۰/۶۲۴	
جرحی	۰/۲۶۸	۰/۰۳۴	۰/۸۲۵	
میانگین وزن ها	۰/۸۴۴	۰/۶۱۳	۰/۸۲۲	

و در نهایت مدل پارت را با استفاده از روش تقسیم درصدی مورد بررسی قرار دادیم. ماتریس درهم ریختگی حاصل از این بررسی در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳- ماتریس درهم ریختگی مدل پارت با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۸۳	۴	۲۰
فوتی	۵	۰	۲
جرحی	۲۳	۲	۱۲

سایر شاخص‌های ارزیابی حاصل شده توسط این روش در جدول ۱۴ به نمایش درآمده است.

جدول ۱۴- شاخص‌های ارزیابی مدل پارت با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۲۲	۰/۶۳۶	۰/۷۷۷	تمرین: ۰/۲۷
فوتی	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۷۶۵	
جرحی	۰/۳۲۴	۰/۰۷۰	۰/۷۹۸	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن‌ها	۰/۸۴۰	۰/۵۶۴	۰/۷۷۹	

مدل بیزین ساده

مدل بیزین ساده بر روی داده‌های زنجان-تبریز با سه روش داده‌های تمرینی، اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و تقسیم درصدی محاسبه شده است. در زیر ماتریس درهم ریختگی برای روش داده‌های تمرینی مطابق جدول ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۱۵- ماتریس درهم ریختگی مدل بیزین ساده با روش داده‌های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۷۷۳	۹	۲۰۵
فوتی	۱۲	۱۱	۱۸
جرحی	۲۶	۷	۱۰۹

شاخص‌های دیگر بررسی شده برای این مدل بر اساس داده‌ها، در جدول ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۶- شاخص‌های ارزیابی مدل بیزین ساده با روش داده‌های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۷۸۳	۰/۲۰۸	۰/۸۶۳	تمرین: ۰/۰
فوتی	۰/۲۶۸	۰/۰۱۴	۰/۸۴۹	
جرحی	۰/۷۶۸	۰/۲۱۷	۰/۸۴۵	آزمون: ۰/۰۲
میانگین وزن‌ها	۰/۷۶۳	۰/۲۰۲	۰/۸۶۱	

بر همین اساس این مدل برای روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه نیز مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج ماتریس درهم ریختگی حاصل شده از این بررسی در جدول ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۱۷- ماتریس درهم ریختگی مدل بیزین ساده با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۷۷۳	۷	۲۰۷
فوتی	۱۲	۶	۲۳
جرحی	۲۸	۱۰	۱۰۴

شاخص‌ها نیز پس از حصول نتایج ماتریس درهم ریختگی برای این مدل بر اساس روش اعتبارسنجی متقاطع محاسبه گردید. نتایج آن در جدول ۱۸ نمایش داده شده است.

جدول ۱۸- شاخص‌های ارزیابی مدل بیزین ساده با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۷۸۳	۰/۲۱۹	۰/۸۵۱	تمرین: ۰/۰
فوتی	۰/۱۴۶	۰/۰۱۵	۰/۸۰۵	
جرحی	۰/۷۳۲	۰/۲۲۴	۰/۸۲۶	
میانگین وزن‌ها	۰/۷۵۵	۰/۲۱۲	۰/۸۴۶	

و در نهایت این مدل بر اساس روش تقسیم درصدی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از ماتریس درهم ریختگی در جدول ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۹- ماتریس درهم ریختگی مدل بیزین ساده با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۲۲	۴	۸۱
فوتی	۲	۰	۵
جرحی	۸	۰	۲۹

شاخص‌ها برای روش تقسیم درصدی بر اساس مدل بیزین ساده نیز محاسبه شدند که در جدول ۲۰ ارائه شده است.

جدول ۲۰- شاخص‌های ارزیابی مدل بیزین ساده با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۷۲۳	۰/۲۲۷	۰/۸۲۶	تمرین: ۰/۰
فوتی	۰/۰۰۰	۰/۰۱۲	۰/۸۲۴	
جرحی	۰/۷۸۴	۰/۲۷۴	۰/۸۳۲	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن‌ها	۰/۷۱۵	۰/۲۲۸	۰/۸۲۶	

مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

مدل پرسپترون چندلایه بر روی داده‌های زنجان-تبریز با سه روش داده‌های تمرینی، اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و تقسیم درصدی با ۷۰ درصد داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌های آزمون محاسبه شده است. در زیر ماتریس درهم ریختگی برای روش داده‌های تمرینی مطابق جدول ۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۲۱- ماتریس درهم ریختگی مدل پرسپترون با روش داده های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۷۱	۰	۱۶
فوتی	۱۵	۲۴	۲
جرحی	۷۴	۰	۶۸

شاخص های دیگر که بر اساس همین روش محاسبه شده اند در جدول ۲۲ ارائه شده است.

جدول ۲۲- شاخص های ارزیابی مدل پرسپترون با روش داده های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۸۴	۰/۴۸۶	۰/۹۴۳	تمرین: ۲۸/۸
فوتی	۰/۵۸۵	۰/۰۰۰	۰/۹۳۶	
جرحی	۰/۴۷۹	۰/۰۱۸	۰/۹۳۹	آزمون: ۰/۰۵
میانگین وزن ها	۰/۹۰۹	۰/۴۱۲	۰/۹۴۲	

سپس این مدل را بر اساس روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه مورد بررسی قرار دادیم. نتایج ماتریس درهم ریختگی حاصل شده از آن در جدول ۲۳ نشان داده شده است.

جدول ۲۳- ماتریس درهم ریختگی مدل پرسپترون با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۳۶	۸	۴۳
فوتی	۲۷	۶	۸
جرحی	۹۹	۷	۳۶

شاخص های ارزیابی مدل نیز با این روش بررسی شد که نتایج به دست آمده از آن در جدول ۲۴ در زیر به نمایش در آمده است.

جدول ۲۴- شاخص های ارزیابی مدل پرسپترون با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۴۸	۰/۶۸۹	۰/۸۴۴	تمرین: ۲۸/۰۶
فوتی	۰/۱۴۶	۰/۰۱۳	۰/۷۳۲	
جرحی	۰/۲۵۴	۰/۰۵۰	۰/۸۲۱	
میانگین وزن ها	۰/۸۳۶	۰/۵۸۷	۰/۸۳۷	

و در نهایت روش تقسیم درصدی بر روی این مدل بر اساس داده های موجود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده برای ماتریس درهم ریختگی در جدول ۲۵ نشان داده شده است.

جدول ۲۵- ماتریس درهم ریختگی مدل پرسپترون با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۷۷	۵	۲۵
فوتی	۶	۰	۱
جرحی	۱۹	۳	۱۵

شاخص‌های به دست آمده بر اساس روش تقسیم درصدی برای این مدل نیز در جدول ۲۶ آورده شده است.

جدول ۲۶- شاخص‌های ارزیابی مدل پرسپترون با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۰۲	۰/۵۶۸	۰/۸۱۲	تمرین:
فوتی	۰/۰۰۰	۰/۰۲۳	۰/۵۸۷	۲۸/۱۷
جرحی	۰/۴۰۵	۰/۰۸۳	۰/۸۳۷	آزمون:
میانگین وزن‌ها	۰/۸۳۲	۰/۵۰۶	۰/۸۱۱	۰/۰۲

مدل لجستیک

این مدل نیز بر روی داده‌های زنجان-تبریز با سه روش داده‌های تمرینی، اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و تقسیم درصدی مورد بررسی قرار گرفت. ماتریس درهم ریختگی برای داده‌ها تمرینی بر اساس این مدل در جدول ۲۷ آورده شده است.

جدول ۲۷- ماتریس درهم ریختگی مدل لجستیک با روش داده‌های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۷۹	۱	۷
فوتی	۲۴	۱۰	۷
جرحی	۱۰۰	۲	۴۰

سایر شاخص‌های محاسبه شده برای این مدل بر اساس داده‌های تمرینی در جدول ۲۸ نشان داده شده است.

جدول ۲۸- شاخص‌های ارزیابی مدل لجستیک با روش داده‌های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۹۲	۰/۶۷۸	۰/۸۸۹	تمرین:
فوتی	۰/۲۴۴	۰/۰۰۳	۰/۸۹۰	۰/۴۵
جرحی	۰/۲۸۲	۰/۰۱۴	۰/۸۸۲	آزمون:
میانگین وزن‌ها	۰/۸۷۹	۰/۵۷۳	۰/۸۸۸	۰/۰۱

ماتریس درهم ریختگی با روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه برای این مدل در جدول ۲۹ در زیر نشان داده شده است.

جدول ۲۹- ماتریس درهم ریختگی مدل لجستیک با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۶۱	۶	۲۰
فوتی	۲۹	۴	۸
جرحی	۱۰۹	۷	۲۶

شاخص‌های ارزیابی مدل نیز برای این روش مورد بررسی و محاسبه قرار گرفت که نتایج حاصل شده از آن در جدول ۳۰ آورده شده است.

جدول ۳۰- شاخص های ارزیابی مدل لجستیک با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۷۴	۰/۷۵۴	۰/۸۱۸	تمرین: ۰/۳۱
فوتی	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲	۰/۶۷۲	
جرحی	۰/۱۸۳	۰/۰۲۷	۰/۸۰۱	
میانگین وزن ها	۰/۸۴۷	۰/۶۴۰	۰/۸۱۱	

در نهایت روش تقسیم درصدی نیز همچون سایرین برای این مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. ماتریس درهم ریختگی برای این روش در جدول ۳۱ آورده شده است.

جدول ۳۱- ماتریس درهم ریختگی مدل لجستیک با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۸۰	۹	۱۸
فوتی	۵	۰	۲
جرحی	۲۴	۲	۱۱

شاخص های ارزیابی مدل لجستیک مطابق با جدول ۳۲ محاسبه شده است که در زیر به نمایش درآمده است.

جدول ۳۲- شاخص های ارزیابی مدل لجستیک با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۱۲	۰/۶۵۹	۰/۷۹۲	تمرین: ۰/۲۸
فوتی	۰/۰۰۰	۰/۰۳۲	۰/۵۴۴	
جرحی	۰/۲۹۷	۰/۰۶۴	۰/۸۲۴	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن ها	۰/۸۲۹	۰/۵۸۴	۰/۷۹۱	

مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون

این مدل نیز برای داده های زنجان-تبریز با سه روش داده های تمرینی، روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و روش تقسیم درصدی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای روش داده های تمرینی ماتریس درهم ریختگی حاصل شده در جدول ۳۳ نشان داده شده است.

جدول ۳۳- ماتریس درهم ریختگی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش داده های تمرینی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۷۴	۰	۱۳
فوتی	۲۸	۹	۴
جرحی	۹۸	۳	۴۱

شاخص های ارزیابی مدل که برای روش داده های تمرینی محاسبه شده است، در جدول ۳۴ در زیر ارائه شده است.

جدول ۳۴- شاخص‌های ارزیابی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش داده‌های تمرینی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۸۷	۰/۶۸۹	۰/۹۰۰	تمرین: ۱/۰۶
فوتی	۰/۲۲۰	۰/۰۰۳	۰/۸۹۳	
جرحی	۰/۲۸۹	۰/۰۱۷	۰/۸۹۲	آزمون: ۰/۰۱
میانگین وزن‌ها	۰/۸۷۵	۰/۵۸۲	۰/۸۹۸	

روش اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه بر روی این مدل مورد بررسی قرار گرفت. ماتریس در هم ریختگی آن به قرار زیر است که در جدول ۳۵ آورده شده است.

جدول ۳۵- ماتریس درهم ریختگی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش اعتبارسنجی متقاطع

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۹۷۲	۲	۱۳
فوتی	۳۱	۲	۸
جرحی	۱۱۱	۳	۲۸

شاخص‌های به دست آمده برای این مدل بر اساس روش اعتبارسنجی متقاطع نیز در جدول ۳۶ در زیر نشان داده شده است.

جدول ۳۶- شاخص‌های ارزیابی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش اعتبارسنجی متقاطع

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۸۵	۰/۷۷۶	۰/۸۶۸	تمرین: ۰/۶۴
فوتی	۰/۰۴۹	۰/۰۰۴	۰/۷۵۱	
جرحی	۰/۱۹۷	۰/۰۲۰	۰/۸۴۷	
میانگین وزن‌ها	۰/۸۵۶	۰/۶۵۷	۰/۸۶۲	

و آخرین روشی که برای این مدل مورد بررسی قرار گرفت، روش تقسیم درصدی است که ماتریس درهم ریختگی برای آن مطابق جدول ۳۷ است.

جدول ۳۷- ماتریس درهم ریختگی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش تقسیم درصدی

ماتریس درهم ریختگی	خسارتی	فوتی	جرحی
خسارتی	۲۹۷	۰	۱۰
فوتی	۵	۱	۱
جرحی	۲۷	۳	۷

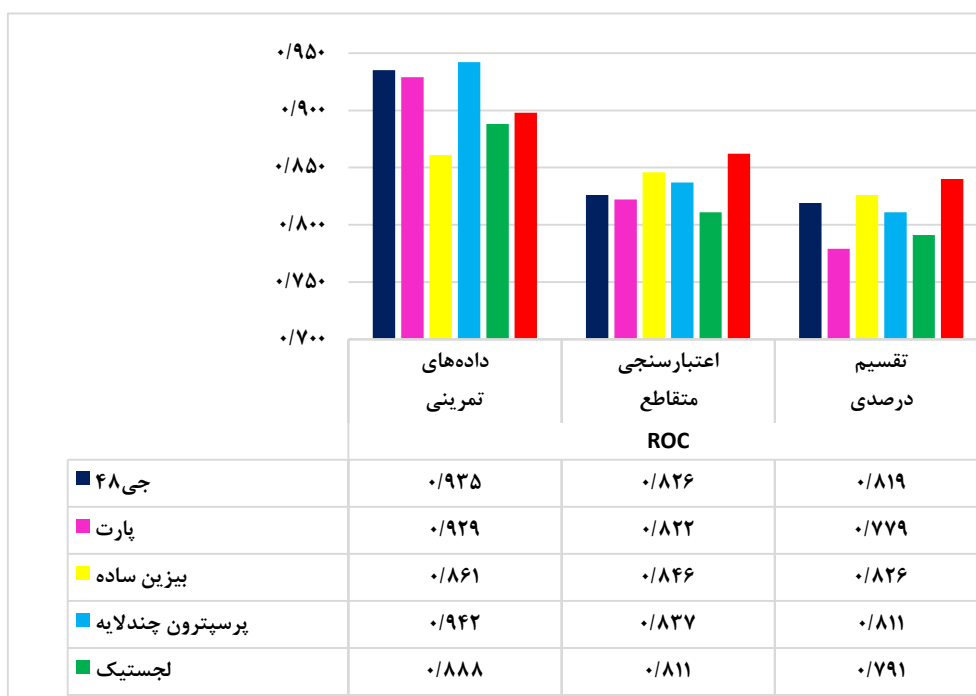
همچنین در نهایت شاخص‌های ارزیابی مدل مطابق با جدول ۳۸ ارائه شده است.

جدول ۳۸- شاخص‌های ارزیابی مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون با روش تقسیم درصدی

کلاس	TP RATE	FP RATE	منحنی ROC	زمان (ثانیه)
خسارتی	۰/۹۶۷	۰/۷۲۷	۰/۸۴۴	تمرین: ۰/۵۵
فوتی	۰/۱۴۳	۰/۰۰۹	۰/۷۶۸	
جرحی	۰/۱۸۹	۰/۰۳۵	۰/۸۲۳	آزمون: ۰/۰
میانگین وزن‌ها	۰/۸۶۹	۰/۶۴۰	۰/۸۴۰	

۴-۳- ارزیابی نتایج منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)

این شاخص ارزیابی یک معیار سنجش میزان کارایی در مسائل طبقه بندی است. این شاخص یک منحنی با نمایش گرافیکی از میزان حساسیت در یک طبقه بندی است که آن را می توان به صورت پیش بینی های درست در مقابل پیش بینی های اشتباه در یک طبقه بندی نیز تعریف کرد. مقادیر عددی حاصل شده از این معیار در نمودار ۲ نشان داده شده است.



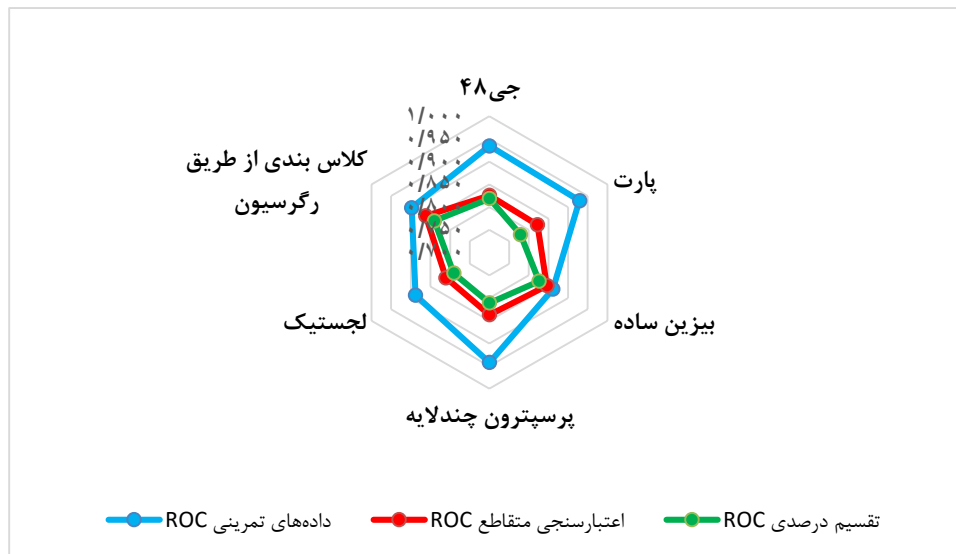
نمودار ۲- نمودار ارزیابی نتایج منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)

نتایج حاصل شده از روش داده های تمرینی نشان می دهد که مدل های پرسپترون چندلایه، جی ۴۸، پارت، پرسپترون چندلایه با مقدار ۰/۹۳۲ بهترین عملکرد را داشت. پس از آن مدل جی ۴۸، پارت، کلاس بندی از طریق رگرسیون، لجستیک و بیزین ساده به ترتیب بهترین عملکرد را داشتند.

در روش اعتبارسنجی مقاطع مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون بهترین عملکرد را از خود نشان داد. پس از آن بیزین ساده، پرسپترون چندلایه، جی ۴۸، پارت و لجستیک بهترین عملکردها را داشتند.

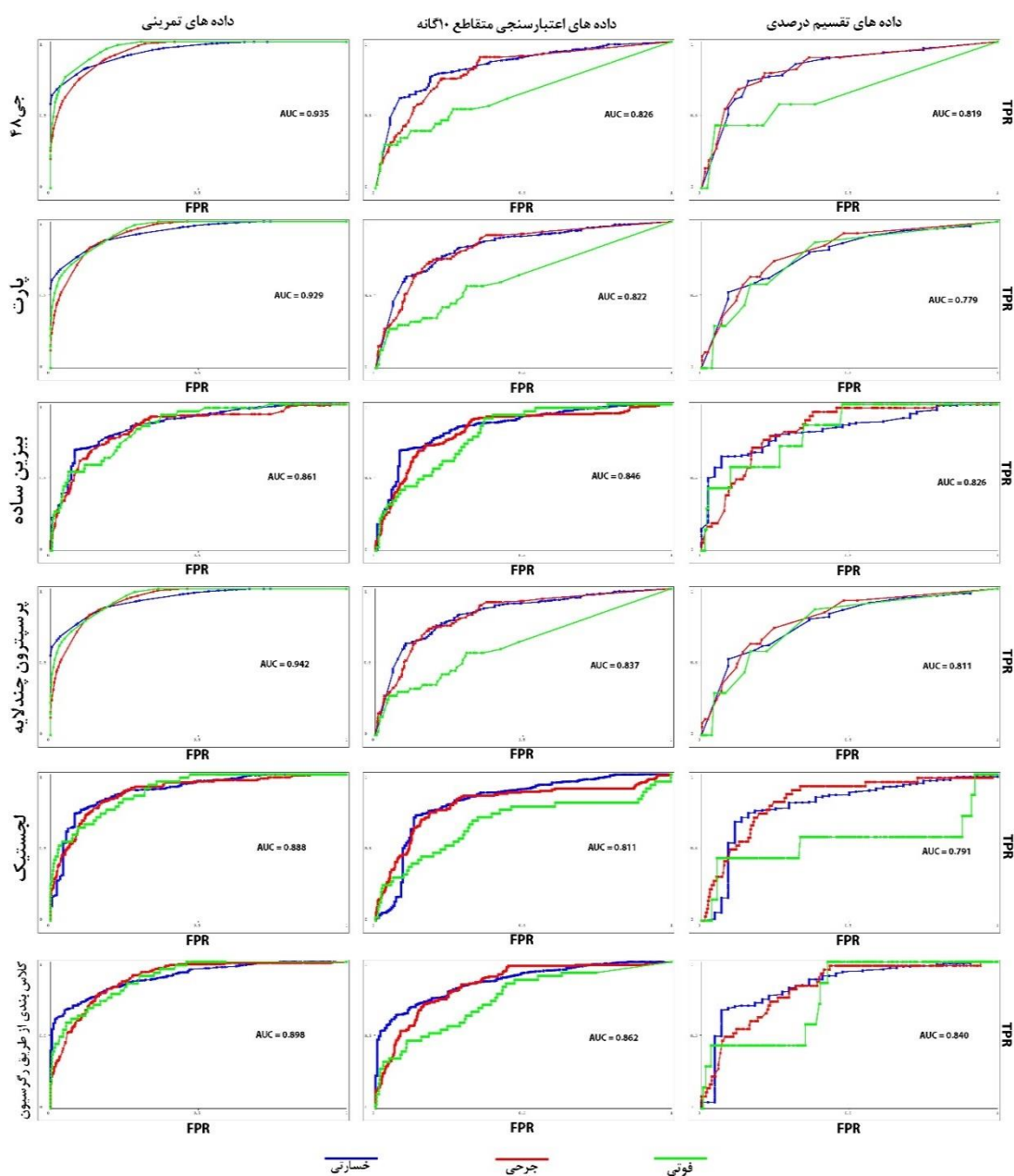
در روش تقسیم درصدی که ملاک اصلی محسوب می شود، مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون بهترین عملکرد را با مقدار ۰/۸۴۰ از خود نشان داد. پس از آن روش بیزین ساده روند ثابت خود را حفظ کرد و با مقدار ۰/۸۲۶ قرار گرفت. سپس مدل های جی ۴۸، پرسپترون، لجستیک و پارت با مقادیر ۰/۸۱۹، ۰/۸۱۱، ۰/۷۹۱ و ۰/۷۷۹ قرار گرفتند.

بر اساس نمودار ۳ که در زیر مشخص است که مدل کلاس بندی از طریق رگرسیون در میان بهترین مدل ها کمترین واریانس را میان روش داده های تمرینی با دو روش دیگر دارد. بیزین ساده نیز از واریانس کمی میان سه روش خود برخوردار است اما عملکرد این مدل نسبت به سایرین ضعیف تر است. مدل جی ۴۸ نیز بیشترین واریانس را میان روش های خود بر اساس این مجموعه داده ها به ثبت رسانید.



نمودار ۳- نمودار عنکبوتی نتایج منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)

این معیار ارزیابی را می‌توان به شکل نمودار نیز مورد بررسی قرار داد. در شکل ۱ در زیر مشاهده می‌کنید که هر یک از مدل‌های داده کاوی مورد استفاده بر اساس سه روش داده‌های تمرینی، اعتبارسنجی متقاطع ۱۰ گانه و تقسیم درصدی به نمایش در آمده است. در این شکل نمودار هر مدل شامل سه نمودار بر اساس خصیصه هدف که شامل موارد خصارتی، جرحی و فوتی است که به ترتیب با رنگ‌های آبی، قرمز و سبز نشان داده شده‌اند و در نهایت مقدار نهایی مجموع سه روش که سطح زیر منحنی نهایی هر روش را بیان می‌کند آورده شده است.



شکل ۱- نمودارهای ROC برای مدل های داده کاوی بر اساس داده های زنجان - تبریز

نتیجه گیری

پژوهش حاضر سعی در فراهم آوردن آگاهی و شناخت مناسب بر اساس رویکردهای داده کاوی، که بخشی از ساختار مهندسی صنایع در پیوند میان علم و صنعت است، برای کشف بهترین مدل های پیش بینی کننده تصادفات ترافیکی برون شهری برای ایران است. این پژوهش با بهره گیری از ۶ مدل داده کاوی علاوه بررسی آن ها از لحاظ دقت پیش بینی که رویکردی علمی و آکادمیک دارد، قوانینی را نیز از میان داده های تصادفات استخراج کرد که می توان بر اساس آن ها اهدافی را برای مدیران مرتبط با تصادفات ترسیم کرد که بر اساس آن به بهبود شرایط اقدام کنند. هدف اصلی این پژوهش بر پایه، شناسایی عوامل کلیدی تصادفات ترافیکی و پیش بینی تصادفات با بهره گیری از رویکرد ها و روش های داده کاوی استوار گردید. مجموعه داده مورد

بررسی در این پژوهش مربوط به محور زنجان-تبریز و شامل ۱۱۷۰ رکورد تصادفات ترافیکی در دوره نزدیک به چهار سال است. در پاسخ به هدف نخست با بررسی های صورت گرفته در مجموعه داده های محور زنجان-تبریز مشخص گردید، خصیصه‌های عامل تصادف، نوع برخورد، مانع دید، موقعیت تصادف، هندسه محل، عامل انسانی، علل اولیه، علل قبلی، علل مستقیم و تاریخ از مهمترین عوامل برای پیش بینی تصادفات ترافیکی در این محور هستند. بنابراین این مجموعه خصیصه‌ها به عنوان بردار ورودی برای پردازش دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در پاسخ به هدف دوم پژوهش، با بررسی های صورت پذیرفته مشخص گردید هر ۶ مدل داده کاوی مورد بررسی در این پژوهش دارای عملکردهای قابل قبولی بودند، هرچند مدل های کلاس بندی از طریق رگرسیون، بیزین ساده و پرسپترون بهترین عملکرد را به ترتیب در میان سایر مدل‌های مورد بررسی از خود نشان دادند. این پژوهش به بررسی تصادفات ترافیکی برون شهری در ایران پرداخت، پیشنهاد می‌گردد در ادامه این روند، معیار درون شهری توسط محققان آتی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین در این پژوهش ۶ مدل داده کاوی جی ۴۸، پارت، بیزین ساده، پرسپترون چندلایه، لجستیک و کلاس‌بندی از طریق رگرسیون مورد ارزیابی قرار گرفت که بر همین اساس پیشنهاد می‌گردد با بررسی سایر مدل‌های داده کاوی با ناظر و بدون ناظر در این زمینه، بانک اطلاعاتی گسترده ای از مقایسه روش‌های مختلف داده کاوی در این زمینه در ایران پدیدار گردد تا علاوه بر شناخت بیشتر از نحوه عملکرد این مدل‌ها و توسعه مرزهای دانش در این حوزه، شاهد بهبود روز افزون الگوریتم‌های محاسبه کننده در این حوزه باشیم. به مدیران تصمیم گیرنده در حوزه تصادفات ترافیکی بر اساس یافته های این پژوهش پیشنهاد می‌گردد که در گام نخست مجموعه داده‌های تصادفات خود را به درستی ثبت و نگهداری کنند. در بسیاری از موارد به دلیل عدم آشنایی کاربر حاضر در صحنه تصادف، اطلاعات به طور دقیق به ثبت نرسیده اند و یا توجهی به آن‌ها نکرده و تنها به عنوان نامشخص بسنده کرده اند. با بررسی خصیصه های مورد استفاده در این پژوهش با خصیصه های مورد استفاده در سایر نقاط جهان مشخص گردید در بسیاری از عوامل کلیدی مانند مشخصات فردی راننده عامل تصادف یا عوامل مهم دیگری چون سرعت در مجموعه داده‌های جمع آوری شده از تصادف موجود نمی‌باشد و به عنوان پیشنهاد به سازمان‌های دخیل در جمع آوری اطلاعات تصادفات در ایران می‌توان بیان داشت که مجموعه داده های جمع آوری شده توسط ایشان مورد تجدید نظر قرار گرفته و عوامل دیگر موثر و دخیل در تصادفات نیز به مجموعه داده ها افزوده شود.

مراجع

۱. M. Taamneh, S. Alkheder, and S. Taamneh. (2017). *Data-mining techniques for traffic accident modeling and prediction in the United Arab Emirates*, Journal of Transportation Safety and Security, Vol.9, pp.146-166.
۲. L. Mussone, M. Bassani, and P. Masci. (۲۰۱۷) *Analysis of factors affecting the severity of crashes in urban road intersections*, Accident Analysis and Prevention, Vol.103, pp.112-122.
۳. Y. Castro and Y. J. Kim. (2016). *Data mining on road safety: Factor assessment on vehicle accidents using classification models*, International Journal of Crashworthiness, Vol.21, pp.104-111.
۴. J. de Oña, R. O. Mujalli, and F. J. Calvo. (2011). *Analysis of traffic accident injury severity on Spanish rural highways using Bayesian networks*, Accident Analysis & Prevention, Vol.43, pp.402-411.
۵. L. Y. Chang and H. W. Wang. (2006). *Analysis of traffic injury severity: An application of non-parametric classification tree techniques*, Accident Analysis and Prevention, Vol.38, pp.1019-1027.
۶. M. M. Besharati and A. Tavakoli Kashani. (2017). *Factors contributing to intercity commercial bus drivers' crash involvement risk*, Archives of Environmental and Occupational Health pp.1-8.

۷. M. B. Anvari, A. Tavakoli Kashani, and R. Rabieyan. (2017). *Identifying the Most Important Factors in the At-Fault Probability of Motorcyclists by Data Mining, Based on Classification Tree Models*, International Journal of Civil Engineering, Vol.15, pp.653-662.
۸. A. Tavakoli Kashani, R. Rabieyan, and M. M. Besharati. (2014). *A data mining approach to investigate the factors influencing the crash severity of motorcycle pillion passengers*, Journal of Safety Research, Vol.51, pp.93-98.
۹. G. Prati, L. Pietrantoni, and F. Fraboni. (2017). *Using data mining techniques to predict the severity of bicycle crashes*, Accident Analysis and Prevention, Vol.101, pp.44-54.
۱۰. S. Kumar and D. Toshniwal. (2017). *Severity analysis of powered two wheeler traffic accidents in Uttarakhand, India*, European Transport Research Review, Vol.9 ,
۱۱. J. Han, J. Pei ,and M. Kamber, *Data mining: concepts and techniques*, (2011): Elsevier.
۱۲. M. Kantardzic, *Data mining: concepts, models, methods, and algorithms*, (2011): John Wiley & Sons.
۱۳. W.-Y. Loh. (2011). *Classification and regression trees*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, Vol.1, pp.14-23.

تحلیل عددی مکانیسم شکست سنگ‌های دارای لایه‌بندی با زوایای مختلف تحت فشار تک‌محوره

حسن سرفراز^۱، عباس مجدی^{۲*}

۱- دانشجوی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران،

sarfaraz@ut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، amajdi@ut.ac.ir

چکیده

ناهمسانگردی یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار سنگ‌ها تحت بارهای وارده بر آن‌ها ایفا می‌کند. با توجه به قابلیت‌های موجود در روش‌های عددی با مبنای المان مجزا در مدلسازی فرآیند شکست نمونه‌های دارای لایه‌بندی و ناهمسانگردی، در این تحقیق با استفاده از این روش و نرم‌افزار UDEC، رفتار سنگ شیبست با زوایای مختلف لایه‌بندی صفر الی ۹۰ درجه (به ازای هر ۱۵ درجه) تحت فشار تک‌محوره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که روش المان مجزا تطابق قابل قبولی با رابطه تئوری دارد و مدلسازی عددی با استفاده روش المان مجزا، روشی مناسب برای مدلسازی سنگ‌های ناهمسانگرد است. همچنین این تحقیق نشان داد که مقاومت حداکثر در سنگ به زاویه لایه‌بندی بستگی دارد و تغییرات آن نسبت به زاویه لایه‌بندی، منحنی U شکل است که حداکثر آن در زاویه لایه‌بندی صفر و ۹۰ درجه و حداقل آن در لایه‌بندی ۶۰ درجه رخ می‌دهد. در نمونه‌های دارای لایه‌بندی افقی، شکست نمونه مشابه سنگ سالم بوده. در لایه‌بندی با زاویه ۱۵ الی ۳۰ درجه، شکست نمونه ترکیبی از لغزش در امتداد ناپیوستگی و ترک کششی در ماتریکس نمونه است و با افزایش زاویه لایه‌بندی از ۳۰ تا ۷۵ درجه، نمونه با لغزش بر روی یک یا چند تا از لایه‌بندی می‌شکند و نهایتاً در لایه‌بندی با زاویه ۹۰ درجه، نمونه در راستای لایه‌بندی به تسلیم می‌رسد.

کلیدواژه‌ها ناپیوستگی، مقاومت فشاری، روش المان مجزا، نرم‌افزار UDE

مقدمه

عموماً سنگ دارای یک ساختار ناهمسانگرد، شامل تعداد زیادی ساختار برشی، صفحات ضعف و ریزترک‌ها می‌باشد که رفتار مکانیکی توده سنگ را تعیین می‌کنند. رفتار بزرگ‌مقیاس فرآیند شکست در سنگ به‌طور گسترده به‌وسیله رفتار ریزترک‌ها (شروع^۱، گسترش^۲ و به هم وصل شدن ترک‌ها^۳) تحت تأثیر قرار گرفته است. درزه‌ها و ترک‌ها از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث ایجاد ویژگی ناهمسانگردی مقاومتی سنگ شده و سبب کاهش مقاومت سنگ می‌گردند. در نتیجه برای توصیف رفتار سنگ حتماً باید ویژگی مربوط به این ساختارها و میزان تأثیرپذیری آن‌ها بر روی سنگ موردتوجه و بررسی قرار گیرد [۱].

ناهمسانگردی یکی از شاخصه‌های سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است که سنگ دارای صفحات ضعف مانند فولیاسیون، لایه‌بندی و شیبستوزیته است. این خصوصیت منجر به تغییر خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ نسبت به جهت نمونه‌گیری و همچنین راستای بارگذاری در آن می‌شود. حالت رایج و دارای تقارن الاستیک ناهمسانگردی که به‌طور عمده در این نوع سنگ‌ها

¹ Initiation

² Propagation

³ Coalescence

وجود دارد، همسانگرد عرضی^۱ نامیده می‌شود [۲-۴]. علی‌رغم اهمیت مطالعه بر روی سنگ‌های آنیزوتروپ و رفتار شکست این نوع سنگ‌ها، مطالعات آزمایشگاهی این نوع سنگ‌ها با مشکلاتی نیز همراه است. از مشکلات قابل‌ذکر در تهیه نمونه‌های طبیعی، به دست آوردن تعداد کافی نمونه برای آزمایش با ویژگی یکنواخت و یکسان به دلیل تأثیر عواملی مانند ناهمسانگردی، هوازدگی، بافت، خواص درزه می‌باشد. یکی از روش‌های رفع مشکل تهیه نمونه، ساخت نمونه‌های مصنوعی با در نظر گرفتن عوامل مورد بررسی و مدلسازی عددی می‌باشد [۱].

تحقیقات Donath در سال ۱۹۶۴ بر روی سنگ اسلیت martinsburg نشان داد که مقاومت سنگ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به زاویه موجود در بین امتداد بارگذاری و صفحه کلیواژ بستگی دارد و در زوایای مختلف از لایه‌بندی، با بالا رفتن فشار محصورکننده، افزایش محسوسی در مقاومت فشاری سنگ مشاهده می‌شود [۵]. Maclamore و Gray در سال ۱۹۶۷، رفتار سه نوع سنگ آنیزوتروپ را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش فشار جانبی از ۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع، زاویه صفحه لایه‌بندی از ۳۰ به ۴۰ درجه تغییر می‌کند [۶]. Niandou و همکاران در سال ۱۹۹۷ نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک شیل‌های Tournemire به زاویه صفحات لایه‌بندی وابسته است [۷]. Tien و همکارانش در سال ۲۰۰۶، مطالعات خود را بر روی نمونه‌های دارای همسانگرد عرضی مصنوعی ساخته‌شده در آزمایشگاه پرداختند و بر این اساس مود شکست سنگ‌های دارای همسانگردی عرضی را بر اساس مشاهدات خود دسته‌بندی کردند و مطالعات آن‌ها نشان داد که ماده با مقاومت کمتر، نقش کمتری در تعیین انتشار ترک دارد [۸]. Cho و همکاران در سال ۲۰۱۲، تغییر شکل و مقاومت سه نوع سنگ دارای همسانگردی عرضی را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند [۲].

Min و Park در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش المان مجزا، رفتار مکانیکی سه نوع سنگ شیل، شیست و گنایس دارای همسانگردی عرضی را بررسی کردند [۹]. Chu و همکاران در سال ۲۰۱۳، سنگ شیستی که دارای مدول الاستیسیته آنیزوتروپیک بوده را با استفاده از نرم‌افزار PFC درزه‌هایی با سطح صاف، مدلسازی کردند [۱۰]. Potyondy در سال ۲۰۱۵ یک ماده دارای ناهمسانگردی عرضی را مدلسازی نمود و پارامترهای میکرو مکانیک مناسب برای کالیبراسیون مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوره برآورد شده با نتایج آزمایشگاهی را انتخاب نمود [۱۱]. Hobbs و Ord در سال ۲۰۱۰، مطالعه عددی خود را بر روی مکانیسمی که منجر به تشکیل دسته‌درزه در توده‌های سنگی می‌شود با استفاده از کد PFC به‌صورت دوبعدی انجام دادند و اطلاعات دقیقی از ترک‌ها از منحنی تنش-کرنش نمونه‌های واقعی به دست آوردند [۱۲]. Tang و همکاران، کارهای آزمایشگاهی خود را مشابه کار Ashby و Hallam انجام دادند. در مطالعه‌های عددی آن‌ها، نمونه‌هایی ترک‌دار با استفاده از نرم‌افزار RFPA شبیه‌سازی شد. همچنین رشد ترک با آرایش سه‌گانه در سه حالت مورب، قائم و افقی در نمونه‌های دارای ترک مرکزی تحت آزمون تک‌محوره مطالعه شد [۱۳]. در این تحقیق، تأثیر زاویه قرارگیری صفحات لایه‌بندی بر مقاومت نهایی سنگ تحت فشار تک‌محوره با استفاده از روش المان مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تأثیر ناپیوستگی بر مقاومت نهایی سنگ

شکست در توده سنگ ممکن است معلول لغزیدن در امتداد ناپیوستگی و یا شکست در سنگ سالم باشد. یک صفحه گسلش، یک لایه‌نازک شیل و یا یک بخش نازک هوازده را می‌توان یک ناپیوستگی تلقی کرد. صفحات لایه‌بندی و یا کلیواژ را می‌شود به‌عنوان یک سری ناپیوستگی در نظر گرفت. مقدار و جهت تنش‌های اصلی (نسبت به ناپیوستگی) همراه با پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی، احتمال لغزیدن در امتداد ناپیوستگی را تعیین می‌کند. فرض کنیم که صفحه ناپیوستگی دارای مقاومت برشی تعریف‌شده با معیار شکست کولمب به شرح ذیل باشد [۱۴]:

$$\tau = c_d + \sigma \tan \varphi_d \quad (1)$$

که در آن c_d چسبندگی و φ_d زاویه اصطکاک ناپیوستگی است.

لغزیدن در امتداد صفحه ناپیوستگی ab در شکل ۱ زمانی آغاز می‌شود که تنش برشی در آن صفحه مساوی و یا بزرگ‌تر از مقاومت برشی شود. از روابط تبدیل تنش‌ها، می‌توان تنش‌های عمودی و برشی را به دست آورد [۱۴]:

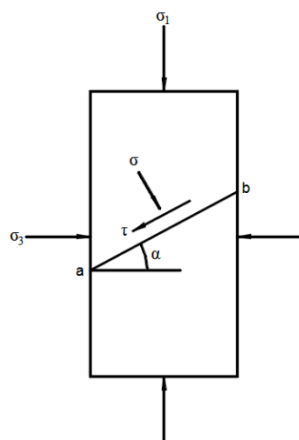
^۱ Transversely isotropic

$$\sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \cos 2\alpha \quad (2)$$

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin 2\alpha \quad (3)$$

که در آن α زاویه ناپیوستگی و جهت تنش اصلی حداقل (σ_3) است. از روابط (۱) الی (۳) معیار لغزش در امتداد صفحه ناپیوستگی به صورت زیر به دست می آید [۱۴]: رابطه (۴)، رابطه jeger و cook نامیده می شود.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_d + \sigma_3 \tan \varphi_d)}{(1 - \tan \varphi_d \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (4)$$

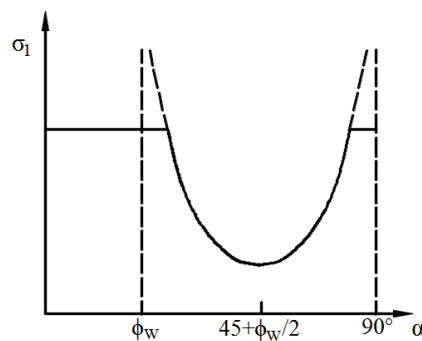


شکل ۱- صفحه ناپیوستگی ab [۱۴]

زمانی که α با φ_d برابر و یا به ۹۰ درجه می رسد، مقدار تفاضل تنش های اصلی که برای ایجاد لغزیدن لازم است به سمت بی نهایت میل می کند. وقتی که α بین φ_d و ۹۰ باشد، لغزیدن در امتداد صفحه ناپیوستگی محتمل می گردد و تنشی که در آن لغزش روی می دهد تابعی از α بوده، از رابطه فوق تعیین می شود [۱۴]. حداقل تنش لازم برای حصول شکست در امتداد صفحه ab وقتی به وقوع می پیوندد که [۱۴]:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_d}{2} \quad (5)$$

اگر شیب صفحه ناپیوستگی در وضعیت مطلوب نباشد، یعنی زاویه α به سمت ۹۰ درجه میل کرده و یا در بین صفر و φ_d باشد، شکست سنگ در امتداد صفحه ای دیگر که در سنگ سالم واقع است به وقوع می پیوندد. خطوط افقی در شکل ۲ که معرف معیار شکست برای سنگ سالم هستند، سهمی موردنظر را در دو نقطه قطع می کنند. برای مقادیری از α که در بین این دو نقطه قرار دارند، شکست سنگ حاصل لغزش در امتداد صفحه ناپیوستگی است و برای شیب های خارج از این نقاط، صفحه شکست از داخل سنگ سالم می گذرد. در مورد یک سری از ناپیوستگی های موازی، روابط فوق قابل تعمیم است [۱۴].

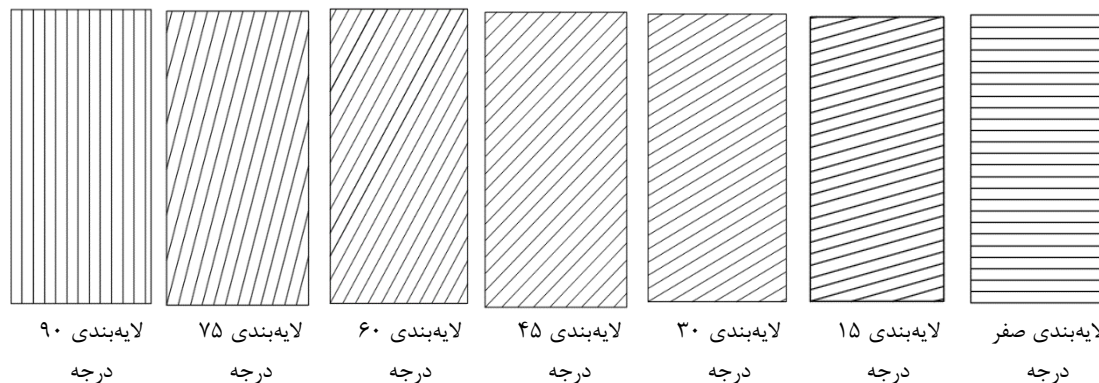


شکل ۲- رابطه بین تنش اصلی و زاویه شیب صفحه ناپیوستگی [۱۴]

مدلسازی عددی

مدل‌های عددی، روش‌های محاسباتی هستند که هدف آن‌ها نشان دادن پاسخ مکانیکی المان‌های مختلف می‌باشد که در معرض شرایطی از قبیل تنش‌های برجا، سطوح آب زیرزمینی، شرایط مرزی و تغییرات ایجاد شده مثل عملیات حفاری یک شیروانی قرار گرفته‌اند. روش‌های عددی توده سنگ و خاک را به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌کنند به‌طوری‌که هر بخش، با ویژگی‌های خاص مدل مربوط به خود تعریف می‌شود. مدل رفتاری ماده با استفاده از روابط تنش-کرنش آن ماده تعیین می‌شود و ساده‌ترین مدل، مدل الاستیک خطی با ویژگی‌های مدول یانگ و نسبت پواسون هست. زون‌ها در مدل عددی ممکن است به یکدیگر متصل باشند که در این صورت مدل پیوسته نامیده می‌شود و ممکن است به‌وسیله ناپیوستگی‌هایی جدا از هم باشند که در این صورت، مدل ناپیوسته نامیده می‌شود. مدل‌های ناپیوسته، امکان لغزش و جدایی در یک سطح در مدل را می‌دهند. بیشتر روش‌های رایج عددی در مسائل مکانیک سنگ، روش‌های پیوسته، ناپیوسته و هیبرید یا ترکیبی هستند. نرم‌افزار UDEC یک برنامه تحلیل عددی دوبعدی است که بر مبنای روش المان‌های مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط‌های ناپیوسته به‌عنوان مثال سنگ تکتونیزه و شدیداً درزه‌دار را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند. [۱۵].

شیستوزیته یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنگ رسوبی و دگرگونی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین رفتار این نوع سنگ‌ها تحت بارهای وارده بر آن‌ها ایفا می‌کند. مطالعه رفتار مکانیکی سنگ‌های رسوبی مانند شیل، ماسه‌سنگ، رس سنگ و گل‌سنگ و سنگ‌های دگرگونی همانند اسلیت و فیلیت در صنایع عمران، معدن و نفت موردتوجه است. پی سازه‌های عمرانی، تونل‌ها و فضا‌های زیرزمینی عمده‌تاً در چنین ساختارهایی قرار دارد. مطالعات عددی با هدف بررسی تأثیر شست‌وزیته و ناپیوستگی بر رفتار مکانیکی و مقاومت نهایی چنین سنگ‌هایی انجام شده است. در این راستا نمونه‌هایی با زوایای مختلف لایه‌بندی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه (شکل ۳) با استفاده از نرم‌افزار UDEC و تحت فشار تک‌محوره بارگذاری گردیدند. در همه موارد نمونه‌ها تحت کرنش صفحه‌ای قرار گرفته است. عرض و ارتفاع نمونه‌ها به ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی‌متر و فاصله‌داری لایه‌ها ۴ میلی‌متر است.



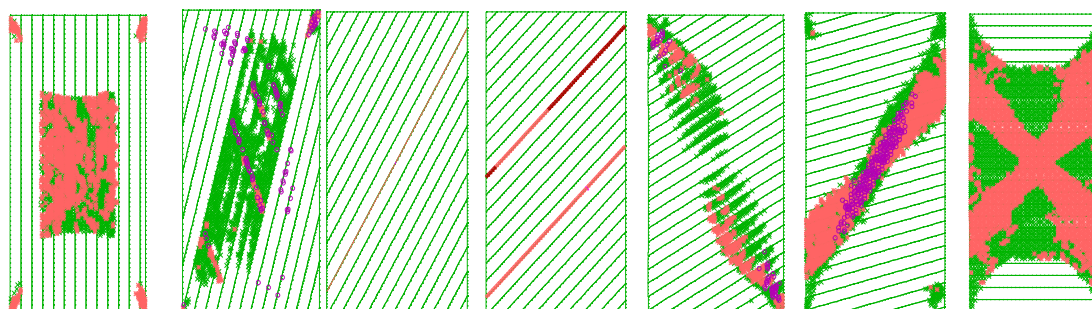
شکل ۳- نمونه‌های مدلسازی با لایه‌بندی مختلف

جنس نمونه‌ها در مدل‌سازی عددی، سنگ شلیست می‌باشد که خصوصیات آن مطابق جدول ۱ می‌باشد. در این مدل‌سازی، برای درزه‌ها از مدل لغزشی کولمب (الاستیک - پلاستیک) و برای مواد از مدل موهر استفاده شده است.

جدول ۱- خصوصیات مورد استفاده در نرم‌افزار UDEC

مشخصات	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (Mpa)	ضریب پواسون (ν)	چسبندگی (Mpa)	اصطکاک اک (درجه)	مقاومت کششی (Mpa)	سختی نرمال لایه‌ها (GP/m)	سختی برشی لایه‌ها (GP/m)	اصطکاک اک لایه‌ها (درجه)	مقاومت کششی لایه‌ها (Mpa)
مقدار	2700	40	0.25	15	35	7.5	10000	1000	20	3

در مدل‌سازی عددی، نمونه‌ها همچون تست تک‌محوره در آزمایشگاه، از طرفین آزاد و از طرف فوقانی و تحتانی بارگذاری می‌شوند. نرخ بارگذاری ممکن است بر رفتار مکانیکی نمونه تأثیر بگذارد. بنابراین، نرخ بارگذاری می‌بایستی تاندازه‌ای آهسته باشد. نرخ متوسط سرعت در مدل‌سازی عددی نمونه‌های شبه سنگی با نرم‌افزار UDEC حدوداً برابر با $1 \times 10^{-5} mm/s$ است. شکل ۳، شکست حاصل از بارگذاری را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار UDEC، نقاط سبز رنگ نشان‌دهنده این است که در چرخه‌های گذشته زمانی، نمونه در این نقاط تسلیم شده و نقاط صورتی رنگ مؤید این است که در این نقاط، نمونه در چرخه زمانی به تسلیم رسیده است. نقاط بنفش رنگ نشانگر این است که نمونه در این نقاط به کشش افتاده و ترک کششی در مدل ایجاد می‌شود.

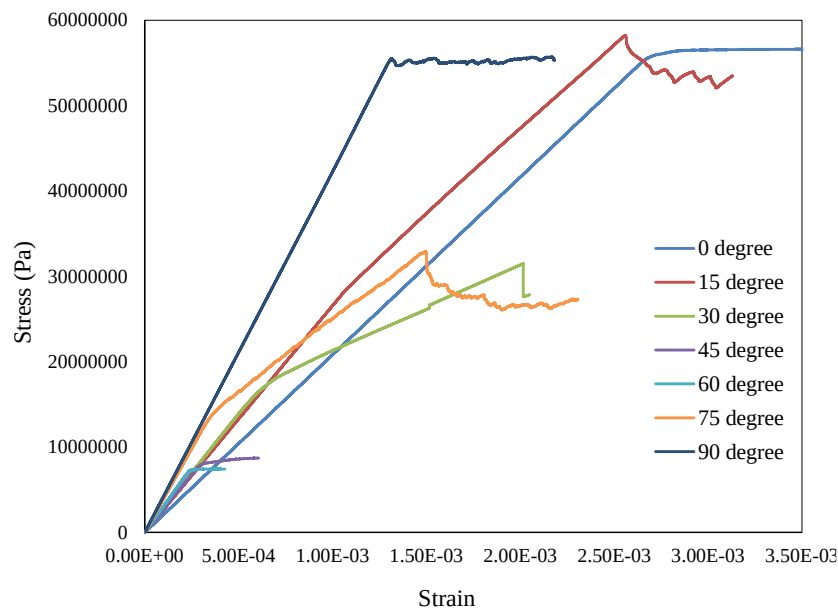


شکل ۴- شکست حاصل از مدل‌سازی نمونه‌ها با لایه‌بندی متفاوت

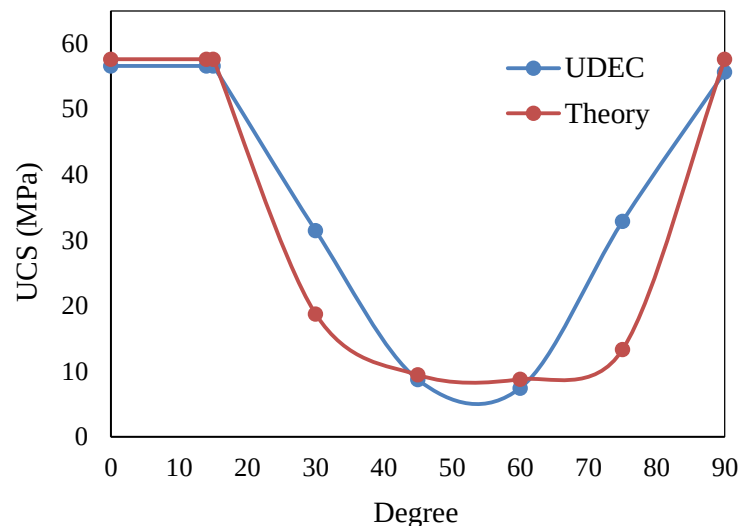
در نمونه با زاویه لایه‌بندی افقی، شکست سنگ در امتداد صفحه‌ای که در سنگ سالم واقع است، به وقوع می‌پیوندد و یا شکست در ماتریکس نمونه رخ می‌دهد و گسیختگی کامل نمونه به صورت برشی است. در لایه‌بندی با زاویه کم (۱۵ الی ۳۰ درجه)، علاوه بر ترک‌های برشی درون لایه‌بندی، ترک‌های کششی در جهت عمود بر لایه‌بندی نیز ایجاد می‌شوند که با پیوستن به هم منجر به شکست نمونه می‌شوند. این مود، ترکیبی از حالت لغزش روی صفحات لایه‌بندی به همراه مود کششی است. بنابراین شکست نمونه به صورت ترکیبی از ترک‌های برشی در امتداد صفحات ضعف و ترک‌های کششی در ماتریکس نمونه است. در لایه‌بندی با زاویه تند (۴۵ الی ۷۵ درجه)، نمونه با لغزش بر روی یک یا چند تا از لایه‌بندی می‌شکنند، به دلیل اینکه مقاومت کمتر لایه‌بندی، عمده ریزترک‌ها در این لایه‌ها تشکیل شده و مسیر شکست نهایی در امتداد این لایه‌بندی‌ها است. در لایه‌بندی با زاویه ۹۰ درجه، نمونه به صورت عمودی و در راستای لایه‌بندی دچار تسلیم می‌شود. زیرا صفحات ضعف به موازات جهت بارگذاری اصلی است.

نتایج

منحنی تنش-کرنش حاصل از مدلسازی عددی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای درک بهتر تأثیر تغییرات زاویه لایه‌بندی بر مقاومت نمونه، تغییرات مقاومت فشاری حداکثر حاصل از مدلسازی عددی و رابطه تئوری (۴) در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر مقاومت در زاویه صفر و ۹۰ درجه و حداقل مقاومت برای لایه‌بندی با زاویه ۶۰ درجه رخ می‌دهد. از آنجایی که ϕ_d برابر با ۲۰ درجه است، مطابق با رابطه تحلیلی (۵)، حداقل تنش لازم برای حصول شکست در زاویه لایه‌بندی ۵۵ درجه صورت می‌گیرد.



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها حاصل از مدلسازی عددی تحت بار تک‌محوره



شکل ۶- تغییرات مقاومت حداکثر فشاری نسبت به زاویه لایه‌بندی تحت بار تک‌محوره

برای به دست آوردن هندسه منحنی "U" شکل، دو نسبت نابرابری^۱ و عمق^۲ تعریف می‌شود. نسبت نابرابری تفاوت مقاومت حداکثر فشاری با زاویه لایه‌بندی صفر درجه به زاویه لایه‌بندی ۹۰ درجه است که از نظر هندسی، اختلاف دو لبه منحنی "U" شکل را نشان می‌دهد. نسبت عمق بیانگر نسبت کمینه مقاومت فشاری به بیشینه مقاومت فشاری است. درواقع حاصل نسبت مقاومت فشاری با زاویه لایه‌بندی ۶۰ به مقاومت فشاری با زاویه لایه‌بندی صفر یا ۹۰ درجه (هرکدام که بزرگ‌تر باشد) می‌باشد. از نظر هندسی، این نسبت معرف عمق نسبی منحنی است.

نتیجه‌گیری

ناهمسانگردی از ویژگی‌های شاخص سنگ‌های رسوبی و دگرگونی است. در این تحقیق، با استفاده از روش المان مجزا و نرم‌افزار UDEC، رفتار سنگ شیبست با زوایای مختلف لایه‌بندی صفر الی ۹۰ درجه (به ازای ۱۵ درجه) تحت فشار تک‌محوره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نمونه‌های دارای لایه‌بندی افقی، الگوی شکست نمونه مشابه شکست نمونه ایزوتروپ و سنگ سالم بوده و گسیختگی نمونه به‌صورت برشی است. در لایه‌بندی با زاویه کم، شکست نمونه به‌صورت ترکیبی از ترک‌های برشی در امتداد صفحات ضعف و ترک‌های کششی در ماتریکس نمونه است. در لایه‌بندی با زاویه تند، نمونه با لغزش بر روی یک یا چند تا از لایه‌بندی می‌شکند و در لایه‌بندی با زاویه ۹۰ درجه، نمونه در راستای لایه‌بندی تسلیم می‌شود. منحنی تغییرات مقاومت فشاری حداکثر نسبت به زاویه لایه‌بندی، یک منحنی U شکل است که حداکثر آن در زاویه لایه‌بندی صفر و ۹۰ درجه و حداقل آن در لایه‌بندی ۶۰ درجه رخ می‌دهد. مدلسازی با استفاده از روش المان مجزا نشان داد که این روش، روشی مناسب برای مدلسازی سنگ‌های ناهمسانگرد است و نتایج مدلسازی مطابقت قابل قبولی با رابطه تئوری دارد.

مراجع

- [1] Tang, C.A., and Hudson, J.A. (2010). "Rock failure mechanisms: explained and illustrated". CRC.
- [2] Amadei, B. (1996). "Important of anisotropy when estimating and measuring insitu stresses in rock". International journal of Rock Mech Min Sci Geomech Abstr; 33(3): 293-325
- [3] Cho, J.W. Kim, H. Jeon, S. Min, K.B., (2012), "Deformation and strength anisotropy of Asan geneiss, Boryeong shale and Yeoncheon schist", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 50(12):158-169
- [4] Kim, H. Cho, J.W. Song, I. Min, K.B. (2012), "Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities and thermal conductivities of Asan Geneiss, Boryeong shale and Yeoncheon schist", Eng Geol; 147: 68-77
- [5] Donath, F.A., (1964), "Strength variation and deformation behavior of anisotropic rocks", State of sree Co, 281-298.
- [6] Maclamore, R., Gray, K.E., (1967), "The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. Series B. Vol. 89, 62-76
- [7] Niandou, H., Shao, J.F., Henry, J.P., (1997), "Laboratory investigation of mechanical behavior of Tournemire shale", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 34:3-16.
- [8] Tien, Y.M., Kuo, M.C., and Juang, C.H., (2006), "An experimental investigation of failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 43(8), 1163-1181.
- [9] Bona Park and Ki-Bok Min., (2015), "Bonded particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 76, 243-255
- [10] Chu, W., Zhang, C., and Hou, J., (2013), "A particle based model for studying anisotropic strength and deformation of schist, In ISRM SINOROCK, International Society for Rock Mechanics.
- [11] Potyondy, D.O., (2015), "The bonded particle model as tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions, Geosystem Engineering, 18(1), 1-28

¹ Unevenness ratio

² Depth ratio

- [12] Ord, A., and Hobbs, B.E. (2010). "Fracture pattern formation in fractional, cohesive, granular material". Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 368(1910), 95-118
- [13] Tang C.A. (2010). "Rock failure mechanism" CRC; 7:121-129
- [14] Hudson, J.A., and Harrison, J.P., (1997), "Engineering rock Mechanics, An introduction to the principles", Pergamon.
- [15] Itasca Consulting Group, UDEC- Universal Distinct Element Code, version 6, 2014.

Numerical Analysis of the Failure Mechanism of Laminated Rocks under Uniaxial Compressive strength

Hasan Sarafraz, Abas Majdi

Abstract

The most common feature of the sedimentary and metamorphic rocks is anisotropy. It plays a significant role in the behavior of this type of rocks under applied forces. With regard to the capabilities of numerical methods based on Distinct elements Method (DEM) in fracture failure modeling, the samples with layering and anisotropy, in this study, using this numerical method (DEM) and UDEC software, behavior of Schist rock Was investigated with different angles of layering from horizontal to 90 Degree (for 15 degrees) under uniaxial compressive strength. The results of this study showed that the distinct elemental method has an acceptable agreement with Jeager and Cook's analytical relationship, and numerical modeling using this method is a suitable method for simulation of anisotropic rocks. The result also showed that the maximum strength in the rock depends on the angle of the layering, and its variation is in the shape of a U-shaped curve. Maximum variations are in layers with angles of 0 and 90 degrees, and at least is in layers with a 60-degree angle. In samples with horizontal layering, the failure is similar to the rock without layers. In layers at 15 to 30 degrees, the failure of the sample is a combination of slip along the discontinuity and cracks in the matrix of the sample. By increasing the angle of layering from 30 to 75 degrees, the sample slip along one or several layers, and eventually in Layering with a 90-degree angle, the sample fails in direction of layering.

روش‌های رایج مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت

سحر امیری

استفاده از سورفکتانت آنیونی با هدف افزایش بازیافت نفت برای مخازن نفت معمولی با استفاده از سیلاب زنی

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده

شناسایی عوامل کلیدی و بررسی دقت پیش بینی مدل‌های داده کاوی در تصادفات ترافیکی محور زنجان-تبریز

بهزاد مسلم، فرزاد موحدی سبحانی، عباس سقایی

تحلیل عددی مکانیسم شکست سنگ‌های دارای لایه‌بندی با زوایای مختلف تحت فشار تک‌محوره

حسن سرفراز، عباس مجدی

پژوهش‌های نوین فالم‌مهندسی

۰۲۱ ۳۳۳ ۲۰ ۲۴۸۷



۰۲۱ ۴۳۸۵۷۱ ۲۴

۰۲۶ ۳۲۷۲ ۴۷۸۷

۰۲۶ ۳۲۷۴ ۷۱۵۸

تهران: افسریه، ۱۵ متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج: چهارراه هفت‌تیر، خیابان لاله ۱، پلاک ۱۴، طبقه همکف