

## ارائه روشی جدید برای رده‌بندی درزها با رویکرد بهینه رده‌بندی کننده بیزین

نویسنده: بهزاد تخم‌چی\*، حسین معماریان\*، حسین احمدی نویری\* و بهزاد مشیری\*\*

\* دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\*\* دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۳/۱۱

### چکیده

درزنگاری در پروژه‌های اکتشاف نفت و معدن، مطالعات ساختگاهی و زمین‌شناسی، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. به طور معمول، بسته به هدف از مطالعه درزها، ویژگی‌های مختلفی از آنها به صورت برجا برداشت می‌شود. برای مثال در مطالعات مخزن، علاوه بر ویژگی‌های ساختاری، بررسی میزان بازشدگی و پرشدگی درزها و شبکه ارتباطی آنها، برای مدل‌سازی جریان سیال، اهمیت ویژه‌ای دارد. اما از آنجا که درزها ماهیت پیچیده‌ای دارند، اغلب شناخت آنها بدون رده‌بندی ممکن نیست. لذا توجه به این نکته ضروری است که در رده‌بندی درزها، از کلیه ویژگی‌های تأثیرگذار در تفسیر نتایج رده‌بندی استفاده شود. این در حالی است که به صورت متداول، حداکثر دو ویژگی شیب و جهت شیب، برای رده‌بندی درزها مورد استفاده قرار می‌گیرند و دیگر ویژگی‌ها، نادیده گرفته می‌شوند. در این مقاله، روشی جدید برای رده‌بندی درزها ارائه شده است.

برای بررسی کارایی و مزیت روش جدید، یک مجموعه مصنوعی از درزها، شامل ۸ دسته درز ساخته شده است و برای هر درزه، ۴ ویژگی شیب، جهت شیب، میزان پرشدگی و نوع پُرکننده در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که جدایش دسته درزها بر اساس ویژگی‌های شیب و جهت شیب ناممکن باشد. سپس برنامه‌هایی برای استفاده از روش رده‌بندی بیزین (Bayesian)، نوشته شده و در فضای ۴ بُعدی نسبت به رده‌بندی داده‌های مصنوعی اقدام شده است. به این ترتیب اثبات شده که با دقت بسیار مطلوب‌تری، کلیه ۸ دسته درزه را می‌توان از هم تفکیک کرد.

کلید واژه‌ها: درزه، رده‌بندی، خوشه‌بندی، ویژگی‌ها، بیزین

### ۱- مقدمه

معمولاً تفکیک دسته درزها، بر اساس دو ویژگی شیب و جهت شیب، صورت می‌گیرد. ابزارهای متفاوتی برای نمایش نتایج این شیوه رده‌بندی وجود دارد که متداول‌ترین آن نمودارهای گل سرخی و شبکه استریونت است. در نمودارهای گل سرخی، صفحه جغرافیایی به تعدادی قاچ تقسیم شده و فراوانی امتداد یا جهت شیب درزهای برداشت شده در هر قاچ به صورت خطی با بلندای متناسب با فراوانی درزهای واقع در آن راستا، در مرکز قاچ رسم می‌شود. از اتصال نقاط انتهایی این خطوط به یکدیگر، نموداری تحت عنوان نمودار گل سرخی شکل می‌گیرد. نمودار گل سرخی اطلاعاتی از شیب درزها به دست نمی‌دهد، مگر این که مقدار میانگین شیب در کنار هر دسته، درج شده باشد.

در شبکه استریونت، امکان تفسیر نتایج بر اساس دو ویژگی شیب و جهت شیب مهیا شده و به این ترتیب منحنی‌های هم‌تراکم قطب رسم می‌شوند. سپس با تفسیر تصویر استریوگرافیک حاصل، تعداد و مشخصات دسته درزها مشخص می‌شود.

در روش‌های فوق، از یک ویژگی درزه (امتداد یا جهت شیب در نمودار گل سرخی) و یا حداکثر از دو ویژگی (جهت شیب و شیب در استریونت) برای رده‌بندی آن استفاده می‌شود. اکنون پرسشی بدین صورت مطرح می‌شود که آیا می‌توان بر اساس تنها یک یا دو ویژگی (جهت شیب و شیب)، رده‌بندی صحیحی از درزها ارائه کرد؟ بدون شک پاسخ منفی خواهد بود (Memarian & Fergusson, 2003). برای روشن شدن مطلب به مثال زیر توجه شود.

در شکل ۱- الف، ۲ درزه با امتداد یکسان اما جهت شیب متفاوت نمایش داده شده است. این دو درزه را با نمودار گل سرخی امتدادی نمی‌توان از هم تفکیک کرد (شکل ۱- ب)، هر چند، نمودار گل سرخی جهت شیب، این قابلیت را دارد که آنها را از هم تفکیک کند (شکل ۱- ج). در شکل ۱- د، ۲ درزه با امتداد و جهت شیب یکسان آورده شده‌اند. تفاوت این ۲ درز در میزان شیب آنهاست. این دو درزه را با نمودار

گل سرخی جهت شیب نیز نمی‌توان از هم تفکیک کرد (شکل ۱- ه). لذا نمودار گل سرخی در بسیاری موارد، کارایی خود را در رده‌بندی درزها از دست می‌دهد. جالب اینجاست که در بسیاری مواقع، بویژه وقتی واریانس تغییرپذیری اندازه شیب زیاد باشد، این دو درزه را حتی با استریونت هم نمی‌توان از هم تفکیک کرد (شکل ۱- و). اما مشکل رده‌بندی درزها با استفاده از تصاویر استریوگرافیک، زمانی جدی‌تر می‌شود که بیش از دو ویژگی شیب و جهت شیب، در معرفی دسته درزها نقش بازی کنند. برای مثال، دو درزه با شیب و جهت شیب یکسان، اما با پرشدگی یا باز شدگی متفاوت، که نقشی متفاوت در جریان سیال در منابع زیرزمینی آب یا هیدروکربن دارند، را به هیچ عنوان نمی‌توان با تصاویر استریوگرافیک از هم تفکیک کرد. چرا که تصاویر استریوگرافیک این دو درزه، بر هم منطبق خواهد بود. بنابراین، باید شیوه‌ای برای رده‌بندی درزها ارائه کرد که قادر به حل چنین مشکلاتی باشد. به عبارت دیگر، امکان تفکیک درزهای با ویژگی‌های مختلف را داشته باشد. در این رابطه، توجه به این نکته حائز اهمیت است که نظر به نوع مطالعه زمین‌شناسی و یا مهندسی، ویژگی‌های مختلفی از درزها همچون شیب، جهت شیب، تداوم، فاصله‌داری، زبری، پرشدگی، بازشدگی، مقاومت دیواره و نشست آب برداشت می‌شود، که همه این ویژگی‌ها می‌توانند در رده‌بندی درزها نقش داشته باشند. بنابراین در رویکرد جدید رده‌بندی درزها، باید از دیگر ویژگی‌های درزها نیز برای رده‌بندی آنها بهره جست، که بدین ترتیب رده‌بندی در فضای  $n$  بُعدی (n: تعداد ویژگی‌های مورد بررسی است)، صورت خواهد گرفت.

لازم به ذکر است نرم‌افزارهایی همچون Dips، قابلیت پذیرش دیگر ویژگی‌های درزها، را دارند. اما این نرم‌افزارها، تنها می‌توانند بر اساس تک ویژگی‌ها نسبت به رده‌بندی درزها اقدام کنند. به عبارت دقیق‌تر در این نرم‌افزارها، نمودارهای توزیع فراوانی ویژگی‌های مختلف درزها در رده‌بندی آنها می‌توانند مؤثر باشند، که طبیعتاً

در صورت استفاده از روش‌های متداول رده‌بندی (نمودار گل سرخی و استریوت)، تعداد دسته درزه‌ها کمتر از تعداد واقعی نمایانده شود. بر این اساس رده‌بندی به ۳ روش (نمودار گل سرخی، استریوت و بیزین) صورت گرفته تا نقص روش‌های موجود و قابلیت‌های روش بیزین، مشخص شود.

## ۲- رده‌بندی به روش بیزین

هر جا که با مجموعه‌ای از داده‌ها رویه‌رو هستیم، رده‌بندی آنها به گروه‌های کم و بیش همخوان مورد توجه قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر روش‌های متعدد نوینی برای رده‌بندی (یادگیری با نظارت) و خوشه‌بندی (یادگیری بدون نظارت) داده‌ها در دیگر شاخه‌های مهندسی و بویژه مهندسی برق ارائه شده است. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که اغلب این روش‌ها را می‌توان با موفقیت برای رده‌بندی داده‌های زمین‌شناسی و معدنی به کار گرفت. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های رده‌بندی: K NN (K Nearest Neighbor)، پارزن (Parzen)، بیزین، شبکه عصبی (neural networks)، رده‌بندی کننده خطی (linear classifier) و کمینه ریسک (minimum risk) و از بین روش‌های خوشه‌بندی نیز می‌توان به روش‌های: میانگین K داده (K means clustering)، میانگین فازی K داده (fuzzy K means clustering) و گوستاوسون - کسل (Gustafson - Kessel) اشاره کرد.

به طور کلی در رده‌بندی، تعدادی رده با اعضای مشخص وجود دارد که بعضی ویژگی‌های این اعضا نیز مشخص است. در رده‌بندی به طور معمول به دنبال یافتن الگوریتمی هستیم، که بر اساس اطلاعات اولیه از رده‌های مختلف، در صورت ورود یک عضو جدید، تعلق آن به یکی از رده‌های موجود شناخته شود.

در عموم روش‌های رده‌بندی، برای انجام عملیات از یک الگوریتم آموزش و آزمون کمک می‌گیرند. به این ترتیب که داده‌های رده‌های مختلف را به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌کنند. سپس بر اساس یک الگوریتم مشخص و بر اساس داده‌های آموزش، الگوریتم مشخص شده آموزش می‌بیند و در نهایت مطلوبیت کارکرد الگوریتم، با داده‌های آزمون کنترل می‌شود. یکی از این روش‌های رده‌بندی، روش بیزین است. مبنای رده‌بندی در الگوریتم بیزین، احتمالات است. در واقع رده‌بندی بیزین چیزی جز احتمالات شرطی نیست. اما ویژگی بسیار مثبت الگوریتم بیزین، این است که امکان اثبات بهینگی دارد. به عبارت دقیق‌تر اگر اعتبار اطلاعات ورودی به این الگوریتم، که برای رده‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ۱۰۰٪ باشد، می‌توان اثبات کرد که بیزین، در مقایسه با روش‌های دیگر، بهترین رده‌بندی را ارائه می‌کند (Webb, 2002; Duda et al., 2003; Theodoridis & Koutroumbos, 2002). در نظریه بیزین، دو عامل نقش تعیین کننده‌ای در رده‌بندی دارند: یکی دانش اولیه در خصوص تعلق نمونه‌ها به رده‌های مختلف، و دیگری احتمال قرار گیری یک نمونه در یک رده مشخص، به شرط مشاهده بعضی ویژگی‌های آن نمونه (احتمال شرطی). در ابتدا توضیح داده می‌شود که منظور از دانش اولیه چیست؟ فرض کنید از ما سؤال شود ماشینی که در خیابان پارک شده، سواری است یا باری؟ اگر خودرو مذکور را دیده باشیم که طبیعتاً یک پاسخ قطعی به سؤال مذکور خواهیم داد. اما اگر آن خودرو را ندیده باشیم، یک پاسخ احتمال‌پذیر به سؤال خواهیم داد. ولی در ارائه پاسخ احتمال‌پذیرمان، به این نکته توجه خواهیم داشت که در منطقه‌ای که قرار داریم، آیا سواری‌ها بیشترند و یا باری‌ها؟ به عنوان مثال اگر محل استقرار، در دانشگاه باشد، طبیعتاً انتظار داریم که در محوطه دانشگاه خودرو سواری پارک شده باشد و نه خودرو باری. به عبارتی، در صورتی که پاسخ به سؤال اولیه، خودرو سواری باشد، احتمال صحت پاسخ بیشتر است تا این که پاسخ، خودرو باری باشد. این احتمال پیشین را دانش اولیه (A priori knowledge: APK)، می‌نامیم. بدیهی است که دامنه رخداد

این روش با مفهوم رده‌بندی در فضای کلیه ویژگی‌های موجود از درزه‌ها تفاوت ماهوی داشته و نمی‌تواند روش چندان مفیدی باشد.

در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای حل مشکلات رده‌بندی درزه‌ها صورت گرفته، اما متأسفانه پیشرفت‌های کمی حاصل شده است. شاید دو دلیل عمده را بتوان برای کندی سرعت پیشرفت در این حوزه ذکر کرد: الف) ناچیز بودن نسبی حجم تحقیقات و مقالات در زمینه درزه‌ها، که به‌طور عمده به دلیل پیچیدگی رفتار این ساختارهاست و ب) آشنایی بسیار کم کارشناسان معدن، نفت و زمین‌شناسی با روش‌های نوین ساماندهی اطلاعات و بویژه مباحث بازشناخت الگو که در شاخه‌های دیگر مهندسی همچون مهندسی برق به کار گرفته می‌شود. بررسی‌های اندکی در این زمینه در سال‌های اخیر صورت گرفته که از محدودیت‌های آنها، استفاده از حداکثر ۳ ویژگی درزه‌ها برای رده‌بندی و همچنین تنها استفاده از یک روش رده‌بندی یا خوشه‌بندی است. به این ترتیب در این مقالات نسبت به بررسی اهمیت ویژگی‌های مختلف در رده‌بندی درزه‌ها، و همچنین بهینه‌سازی روش‌های رده‌بندی و یا خوشه‌بندی، اقدام نشده است. مطالعات اخیر را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

در سال ۱۹۹۸ الگوریتمی برای خوشه‌بندی فازی (fuzzy clustering)، ارائه شد که هدف آن شناسایی خودکار دسته درزه‌ها بوده است (Hammah & Curran, 1998). در این بررسی عمل خوشه‌بندی روی یک مجموعه داده مصنوعی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول صرفاً جهت شیب و اندازه شیب ملاک خوشه‌بندی بوده و در مرحله دوم ویژگی سوم (زبری) نیز در محاسبات وارد شده است. در دو مرحله اول شک بین گزینش ۳ و ۴ رده برای داده‌ها وجود داشته که با افزودن ویژگی زبری، این مشکل حل شده و ۴ رده به عنوان تعداد رده‌های بهینه انتخاب شده است.

در سال ۲۰۰۱ میلادی، نتایج یک بررسی در زمینه کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در بررسی شکستگی‌ها ارائه شد (Sirat & Talbot, 2001). در این بررسی عمل خوشه‌بندی درزه‌های منطقه‌ای در سوند با استفاده از شبکه عصبی خود تنظیم (self organize)، انجام شده است. با این روش شش دسته درزه در منطقه شناسایی شد، که ظاهراً با واقعیت‌های زمین‌شناسی منطقه انطباق نسبی خوبی داشته است. بیشترین تلاش این محققان، بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها و تعداد نوروهای لازم برای شبکه عصبی بوده است. در سال ۲۰۰۲، نتایج تحقیقی برای خوشه‌بندی درزه‌ها در حالتی که توزیع ویژگی‌های آن‌ها گوسی است ارائه شد (Marcotte & Henry 2002). در این بررسی، که به نظر می‌رسد کامل‌ترین تحقیق منتشر شده در این زمینه باشد، عمل رده‌بندی ۱۱ سری داده مصنوعی، که امکان جدایش آنها تنها با دو ویژگی شیب و جهت شیب وجود داشته، صورت گرفته است. به این منظور ابتدا رده‌بندی کننده آموزش دیده و سپس عمل رده‌بندی صورت گرفته است. نتیجه این بوده که در جاهایی که جدایش خوبی بین رده‌ها وجود داشته، رده‌بندی کننده نیز وظیفه‌اش را به خوبی انجام داده است. در نهایت عملیات رده‌بندی به روی تعدادی داده واقعی صورت گرفته که نتیجه آن نیز مثبت بوده است. و بالاخره در سال ۲۰۰۶، نیز نتایج تحقیقی در مورد خوشه‌بندی درزه‌ها ارائه شده است (Jimenez-Rodriguez & Sitar, 2006). در این بررسی، عمل خوشه‌بندی فازی روی مجموعه‌ای از داده‌های مصنوعی و واقعی انجام شده و نتیجه گرفته شده که این روش، بهتر از روش‌های مرسوم، رده‌بندی دسته درزه‌ها را انجام می‌دهد. نکته جالب این‌که در این بررسی تنها دو ویژگی شیب و جهت شیب وارد عمل خوشه‌بندی شده‌اند و از ویژگی بیشتری برای جدایش استفاده نشده است.

در بررسی حاضر، از رویکرد بهینه رده‌بندی کننده بیزین، برای رده‌بندی مجموعه‌ای از درزه‌های مصنوعی استفاده شده است. برای اثبات نقص روش‌های متداول رده‌بندی درزه‌ها و همچنین قوت رده‌بندی کننده بیزین، در ساخت درزه‌های مصنوعی، اولاً چهار ویژگی برای درزه‌ها در نظر گرفته شده و ثانیاً ویژگی‌ها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که

از دیگر نکات مهم در رده‌بندی بیز، امکان گردآوری ویژگی‌های متعدد از یک شیء یا پدیده است، به گونه‌ای که کل این ویژگی‌ها نیز بتوانند در رده‌بندی شرکت کنند. به عنوان مثال، در مورد خودرو، ممکن است طول، عرض، ارتفاع، وزن و بعضی پارامترهای دیگر آن اندازه‌گیری شده باشد. در این صورت رابطه ۵ صادق بوده و تک متغیر (x) تبدیل به بردار متغیرها (X)، خواهد شد. در شکل ۴، مثالی از رده‌بندی دو رده در فضای دو بعدی، یعنی دو متغیر شرطی کننده، ارائه شده است. همچنین ممکن است، تعداد رده‌ها بیش از ۲ باشد. برای مثال در مورد خودرو، ممکن است ۳ رده به این صورت تعریف شود: الف) سواری، ب) وانت و ج) باری. بدیهی است در این حالت نیز روابط ۵ صادق‌اند، با این تفاوت که نمونه متعلق به رده‌ای خواهد بود که حاصلضرب دانش اولیه در احتمال شرطی آن از دیگر رده‌ها بزرگ‌تر باشد. در شکل ۵، مثالی از رده‌بندی چهار رده در فضای دو بعدی (دو متغیر شرطی کننده) ارائه شده است.

شیوه کار در روش بیزین به این ترتیب است که ابتدا داده‌ها به صورت استاندارد تبدیل می‌شوند. به طور معمول در تمامی رده‌بندی‌ها، استانداردسازی صورت می‌گیرد. برای استاندارد سازی داده‌ها از رابطه زیر می‌توان بهره گرفت:

$$X_i = \frac{x_i - \mu_i}{\delta_i} \quad (6)$$

که در آن، مقدار استاندارد شده یک داده،  $x_i$ ، مقدار واقعی همان داده،  $\mu_i$ ، میانگین داده‌ها و  $\delta_i$ ، انحراف معیار داده‌ها است. به این ترتیب داده‌ها در بازه  $\{-1, 1\}$  قرار می‌گیرند. لذا ویژگی‌های مختلف داده‌ها مستقل از مقیاس شده و نقش یکسانی در رده‌بندی بازی می‌کنند. برای مثال، در این تحقیق بازه اطلاعات جهت شیب  $0^\circ - 360^\circ$  است. این در حالی است که بازه اطلاعات شیب،  $0^\circ - 90^\circ$  است. حال اگر این دو مجموعه داده تبدیل به داده‌های استاندارد نشوند، در عمل اطلاعات جهت شیب نقش پررنگ‌تری در رده‌بندی خواهند داشت که طبیعتاً مطلوب نخواهد بود. توجه شود که عملیات استاندارد سازی برای کل داده‌ها (اعم از آموزش و آزمون) و کلیه ویژگی‌ها (در اینجا جهت شیب، شیب، پرشدگی و نوع پرکننده) صورت می‌گیرد. اما میانگین و انحراف معیار، صرفاً بر اساس اطلاعات داده‌های آموزش محاسبه می‌شوند. چرا که اصولاً فرض بر این است که داده‌های آزمون مشاهده نشده‌اند.

در قدم بعد و بر اساس رابطه ۵، رده‌بندی صورت می‌گیرد. توجه شود که در این تحقیق، چون تعداد داده‌های رده‌های ۸ گانه، برابر در نظر گرفته شده است، لذا، دانش اولیه (APK) در مورد کلیه دسته درزه‌ها یکسان و برابر یک هشتم بوده است. بنابراین حتی می‌توان، APK را از محاسبات حذف کرد. بدیهی است در مواردی که دانش اولیه در مورد دسته‌درزه‌های مختلف متفاوت است (مثلاً تعداد درزه‌های یک دسته درزه دو برابر تعداد درزه‌های دسته دوم است)، APK در محاسبات وارد خواهد شد. در ضمن در این تحقیق، عوامل شرطی ساز عبارتند از: شیب، جهت شیب، میزان پرشدگی و نوع پرشدگی، که بر اساس اطلاعات داده‌های مصنوعی ساخته شده، در محاسبات وارد خواهند شد.

### ۳- ساخت داده‌های مصنوعی

برای انجام بررسی‌های تحقیق حاضر، ابتدا یک سری داده مصنوعی ساخته شده است. داده‌های مصنوعی با این فرض ساخته شده‌اند که تعداد درزه‌های هشت رده در نظر گرفته شده، یکسان باشند. دو مجموعه داده آموزش (train) و آزمون (test)، برای هر رده در نظر گرفته شد. برای آموزش هر رده تعداد ۱۵۰ داده و برای آزمون هر رده تعداد ۵۰ داده فرض گرفته شده است. به این ترتیب، ۱۶۰۰ داده در نظر گرفته شده است. برای هر داده ۴ ویژگی شیب، جهت شیب، میزان پرشدگی و نوع پرکننده

دانش اولیه، [۱۰] است. در روش بیزین، دانش اولیه نقش مهمی در رده‌بندی دارد. لذا تعیین احتمال تعلق یک نمونه به یک رده، پیش از هر نوع مشاهده‌ای، می‌بایست با دقت صورت بگیرد تا رده‌بندی بیز به یک رده‌بندی بهینه نزدیک شود. توجه شود که اگر احتمال سواری بودن را  $P(w_1)$  و احتمال باری بودن را  $P(w_2)$  بنامیم، شروط زیر صادق خواهد بود:

$$P(w_1) > 0 \quad \text{و} \quad P(w_2) > 0 \quad (1)$$

$$P(w_1) + P(w_2) = 1 \quad (2)$$

در روابط فوق،  $w_1$ : معرف رده ۱ (در این مثال خودروهای سواری) و  $w_2$ : معرف رده ۲ (در این مثال خودروهای باری) است.

اما منظور از احتمال شرطی چیست؟ فرض کنید در مثال بالا، طول خودرو نیز اندازه‌گیری شده باشد. به عنوان مثال ذکر شود که طول خودرو ۴ متر است. حال سؤالی به این صورت مطرح خواهد شد: طول ماشینی ۴ متر است، آیا آن ماشین، سواری است یا باری؟ بدیهی است برای پاسخ به این سؤال، باید اطلاعاتی از پیش موجود باشد. مثلاً، فرض کنید ابتدا طول ۱۰۰۰ خودرو اندازه‌گیری شده است. از این بین، طول ۱۰۰ خودرو حدود ۴ متر بوده است، و از بین این ۱۰۰ خودرو، ۸۰ دستگاه، سواری بوده‌اند. در این صورت اگر در پاسخ به سؤال فوق، ذکر شود که خودرو، سواری است، احتمال صحت پاسخ ۸۰٪ خواهد بود، و در صورت ارائه پاسخی به این صورت که خودرو، باری است، احتمال صحت پاسخ، ۲۰٪ خواهد بود. بنابراین، در این مثال و صرفاً بر مبنای احتمالات شرطی، می‌توان فضای تصمیم، و در واقع فضای رده‌بندی را به دو زیر فضای سواری و باری افزایش کرد. در شکل ۲-الف، این افراز در حالتی که توزیع احتمال شرطی، گوسی باشد، نمایش داده شده است. در این شکل، فضای تصمیم به دو زیر فضای رده ۱ و رده ۲ تقسیم شده است.

به عنوان نمونه اگر در مثال بالا، خودرو سواری را به عنوان رده ۱ و خودرو باری را به عنوان رده ۲ در نظر بگیریم، و طول خودرو را با  $x$  نمایش دهیم، احتمال سواری بودن به شرط طول  $x$  را با  $P(w_1|x)$ ، و احتمال باری بودن به شرط طول  $x$  را با  $P(w_2|x)$  نمایش می‌دهند و شروط زیر نیز صادق خواهد بود:

$$P(w_1|x) + P(w_2|x) = 1 \quad (3)$$

$$\text{If } P(w_1|x) > P(w_2|x) \implies w_1 \text{ تصمیم بهینه است} \quad (4)$$

$$\text{If } P(w_2|x) > P(w_1|x) \implies w_2 \text{ تصمیم بهینه است}$$

در مواقعی تصمیم به تعلق یک نمونه در رده ۱ گرفته می‌شود که  $P(w_1|x)$ ، احتمال تصمیم تعلق نمونه به رده ۱، در صورتی که ویژگی  $x$  از نمونه مشاهده شده باشد. احتمال شرطی، از  $P(w_2|x)$  بزرگ‌تر باشد. برای روشن شدن مطلب، زیر فضای تصمیم رده ۱ با  $R$  و زیر فضای تصمیم رده ۲ با  $R_2$  نمایش داده شده است. در شکل ۲-ب، نیز این افراز در حالتی که توزیع احتمال شرطی، گوسی نباشد، نمایش داده شده است. بدیهی است نوع تصمیم‌گیری در حالتی که توزیع گوسی نیست، با حالت پیشین هیچ تفاوتی نخواهد کرد. در شکل ۳ نیز، مثالی از توالی فضاهای رده‌بندی ارائه شده است. در این شکل و طی حرکت از چپ به راست ترتیب فضاهای تصمیم به این صورت خواهد بود: رده ۲ ( $w_2$ )، رده ۱ ( $w_1$ )، رده ۲ ( $w_2$ ) و رده ۱ ( $w_1$ ).

در رده‌بندی بیز، دانش اولیه و احتمال شرطی، توأمان در رده‌بندی نقش بازی می‌کنند و رابطه نهایی رده‌بندی، که در اینجا به دلیل محدودیت صفحات مقاله، از اثبات آن خودداری می‌شود، به صورت زیر خواهد بود (Duda et al., 2003 Webb, 2002).

$$\text{If } P(x|w_1) \times P(w_1) > P(x|w_2) \times P(w_2) \implies w_1 \text{ تصمیم بهینه است} \quad (5)$$

$$\text{If } P(x|w_2) \times P(w_2) > P(x|w_1) \times P(w_1) \implies w_2 \text{ تصمیم بهینه است}$$

طبیعتاً، در صورتی پاسخ رده‌بندی بهینه‌تر خواهد بود که هم دانش اولیه و هم احتمال شرطی، به واقعیت نزدیک‌تر باشند.

در شکل ۷-ب، موضوع قدری پیچیده‌تر است. به ترتیبی که اصولاً امکان‌پذیری تفکیک دسته درزه‌ها بر اساس ویژگی شیب را با تردید مواجه می‌کند (کما این که در عمل نیز چنین است). با نگاهی به جدول‌های ۱ و ۲، مشخص است که با ویژگی‌های میزان پُرشدگی و نوع پُرکننده نیز نمی‌توان دسته درزه‌های ۸ گانه را از هم تفکیک کرد. چرا که این ویژگی‌ها، حداکثر ۳ گزینه برای جدایش دارند (مثلاً ویژگی میزان پُرشدگی ۳ حالت خالی، نیمه پُر و پُر را نمایندگی می‌کند). لذا چون گزینه‌های مورد استفاده برای جدایش از تعداد رده‌ها کمترند، طبیعتاً با هر کدام از این ویژگی‌ها را نمی‌توان بیش از ۳ رده شناسایی کرد. پس مشاهده می‌شود که تنها با استفاده از یک ویژگی (شیب یا جهت شیب یا میزان پُرشدگی و یا نوع پُرکننده)، نمی‌توان رده‌بندی درستی از درزه‌ها ارائه کرد.

در شکل ۸، تمرکز ویژگی‌های دسته درزه‌های ۸ گانه، با در نظر گرفتن دو ویژگی آنها نشان داده شده است. در شکل ۸-الف، از دو ویژگی جهت شیب و شیب و در شکل ۸-ب، از دو ویژگی جهت شیب و نوع پُرکننده، استفاده شده است. در شکل ۸-الف، ملاحظه می‌شود که دسته درزه‌های (۱ و ۲)، (۳ و ۴) و همچنین (۶ و ۷)، قابل جدایش نیستند. به عبارت دیگر، در بهترین حالت، بیش از ۴ دسته درزه قابل شناسایی نیستند. در شکل ۸-ب نیز، بیش از ۴ دسته درزه، قابل شناسایی نیست. در صورت استفاده از هر زوج دیگر از ویژگی‌ها نیز، مشکل شناسایی دسته درزه‌های ۸ گانه حل نخواهد شد (که در اینجا برای رعایت اختصار از آوردن شکل آنها خودداری شده است). بنابراین، مشاهده می‌شود که در اینجا، مطالعه درزه‌ها در فضای ۲ بُعدی، با مشکل شناسایی و جدایش دسته درزه‌ها توأم است.

به طور خلاصه و بر اساس شکل‌های ۶، ۷ و ۸، می‌توان استنتاج کرد که در صورت موجود بودن اطلاعات ویژگی‌های بیشتری از درزه‌ها، استفاده از تنها یک یا دو ویژگی، برای معرفی دسته درزه‌ها با عدم صحت قابل توجهی توأم خواهد بود. به این ترتیب، مشکل رده‌بندی کنندگان (به عبارت صحیح‌تر خوشه‌بندی کنندگان) متداول (نمودار گل سرخی و تصاویر استریوگرافیک)، به وضوح قابل مشاهده است. اما ممکن است این سؤال مطرح شود که چگونه می‌توان این مشکل را حل کرد. در پاسخ تنها باید به یک نکته مشخص اشاره کرد و آن رده‌بندی درزه‌ها در فضای کل مشاهدات صورت گرفته است. برای مثال، در اینجا که برای هر درزه ۴ نوع اطلاعات در نظر گرفته شده، بهتر است رده‌بندی در فضای ۴ بُعدی صورت بگیرد. لذا برای حل مشکل، رده‌بندی درزه‌ها در فضای ۴ بُعدی را بررسی کرده و به این منظور الگوریتم پیش گفته بیزین را به کار می‌بریم.

همچنان که پیش‌تر اشاره شد، مطالعات محدودی در استفاده از روش‌های رده‌بندی و خوشه‌بندی برای شناسایی تعداد و ویژگی‌های دسته درزه‌ها انجام شده است. اما از ویژگی‌های این مطالعات، می‌توان به محدود بودن بُعد فضای ویژگی (تعداد ویژگی‌های درزه‌ها که برای شناسایی الگو استفاده شده‌اند) و همچنین محدود بودن روش‌های مورد استفاده اشاره کرد. در این تحقیق، تلاش شده هر دو این محدودیت‌ها رفع شوند. به گونه‌ای که روش مورد بررسی و برنامه رایانه‌ای که به این منظور تهیه شده است، به هیچ عنوان محدودیت بُعد فضای ویژگی ندارد. به این معنی که برای رده‌بندی دسته درزه‌ها می‌توان از کلیه و یا بخشی از ویژگی‌های آنها، بهره جست.

#### ۵- رده‌بندی ۴ بُعدی دسته درزه‌ها

در بررسی حاضر، برای رده‌بندی دسته درزه‌های مصنوعی، از رویکرد بیزین بهره گرفته شده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، بیزین از بهترین ابزارهای رده‌بندی است که در رده‌بندی سیستم‌های کنترلی رشته‌های برق و رایانه، به فراوانی به کار می‌رود. اما در این تحقیق، برای اولین بار در رده‌بندی دسته درزه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به

در نظر گرفته شده است. ویژگی‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که شیب و جهت شیب درزه‌های رده‌های ۱ و ۲، رده‌های ۳، ۴ و ۵ و همچنین رده‌های ۶، ۷ و ۸ با هم همپوشانی نسبی داشته باشند. بنابراین امکان تفکیک دسته درزه‌های مختلف با استفاده از روش‌های سنتی همچون نمودار گل سرخی و یا استریونت وجود نخواهد داشت. اما ویژگی‌های میزان پُرشدگی و نوع پُرکننده به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که به کمک آنها تفکیک رده‌های ۸ گانه از یکدیگر امکان‌پذیر شود. بنابراین ویژگی‌های دسته درزه‌ها، به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوان نسبت به اثبات ناکارآمدی روش‌های متداول رده‌بندی درزه‌ها، و مطلوبیت استفاده از ویژگی‌های بیشتر برای رده‌بندی درزه‌ها اقدام کرد. بدین منظور و از منظر میزان پُرشدگی، درزه‌ها به سه دسته پُر، نیمه پُر و خالی و از منظر نوع پُرکننده به سه رده پُرکننده کلسیتی، رسی و نبود پُرکننده (در خصوص درزه‌های باز)، تقسیم شده‌اند (جدول ۱). بر این اساس ویژگی‌های کلی ۸ دسته درزه مصنوعی ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است. به عنوان مثال، درزه‌های واقع در رده ۱، جهت شیب ۸۰-۲۰ درجه و شیب ۷۵-۵۰ درجه داشته، پُر شده‌اند و نوع پُرکننده آنها کلسیتی بوده است. لازم به ذکر است که توزیع در نظر گرفته شده برای ساخت داده‌های تصادفی آموزش و آزمون هر رده، گوسی بوده است. در ضمن به طور کلی مقدار شیب یک درزه بین ۹۰-۰ درجه، مقدار جهت شیب یک درزه بین ۳۶۰-۰ درجه و میزان پُرشدگی و نوع پُرکننده آن ۰، ۱/۵ و ۱، بوده است. لازم به ذکر است که برنامه‌های رایانه‌ای نوشته شده در بررسی حاضر، این قابلیت را دارند که در صورت افزودن ویژگی‌های بیشتر، عمل رده‌بندی را حتی با کیفیت بهتری انجام دهند. اما در اینجا صرفاً برای سادگی، از چهار ویژگی درزه‌ها برای رده‌بندی آنها استفاده شده است.

#### ۴- ویژگی داده‌های مصنوعی

درزه‌های مصنوعی ساخته شده، ابتدا با نمودار گل سرخی و سپس با استریونت، رده‌بندی شدند. همچنان که در شکل ۶-الف ملاحظه می‌شود، بر اساس نمودار گل سرخی، به هیچ عنوان امکان تفکیک دسته درزه‌های داده‌های مصنوعی از هم وجود ندارد. چه بسا یک مفسر، بر اساس نمودار گل سرخی رسم شده، یک دسته غالب شمال‌باختری (N-35-W)، یک دسته تقریباً شمالی (N-8-E) و یک دسته کم‌تعدادتر شمال‌خاوری (N-40-E) شناسایی نماید. در حالی که مفسر دیگری ۲ دسته درزه را شناسایی نماید. همین موضوع در رابطه با شکل ۶-ب نیز درست است. به گونه‌ای که در بررسی تصویر استریوگرافیک درزه‌های مصنوعی ساخته شده، شناسایی ۳ و یا حتی ۴ دسته درزه نیز محتمل است. حال سؤال اینجاست که واقعاً براساس تصویر استریوگرافیک مربوطه، چند دسته درزه را می‌توان شناسایی کرد. نکته جالب‌تر این که، پاسخ این سؤال هر چه باشد، امکان شناسایی ۸ دسته درزه مصنوعی ساخته شده بر اساس تصویر استریوگرافیک وجود ندارد. لذا ملاحظه می‌شود که استریونت نیز ابزار کاملاً مناسبی برای تفکیک دسته درزه‌ها نیست.

در شکل ۷، توزیع فراوانی ویژگی‌های جهت شیب (۷-الف) و شیب (۷-ب)، دسته درزه‌های ۸ گانه نشان داده شده است. همچنان که در شکل ۷-الف دیده می‌شود، بر اساس ویژگی جهت شیب، امکان تفکیک دسته درزه ۱ از ۲، همچنین دسته درزه‌های ۳، ۴ و ۵ از ۶ و ۷ وجود نخواهد داشت. کما این که دسته درزه ۸ نیز همپوشانی زیادی با دسته درزه‌های ۶ و ۷ دارد. برای روشن‌تر شدن موضوع، توجه شود که در شکل ۷-الف، و در بازه زاویه‌ای ۲۵ تا ۷۵ درجه، دو دسته درزه ۱ و ۲ بر هم منطبق شده‌اند. لذا بر اساس ویژگی جهت شیب و در این محدوده زاویه‌ای، تنها یک دسته درزه قابل شناسایی است که با واقعیت داده‌های مصنوعی ساخته شده سازگار نیست.

کامل سازگار است. چرا که درزه‌های ۳ دسته درز ۲، ۳ و ۴، از منظر جهت شیب و شیب، شباهت‌های بسیاری با هم دارند.

برای بررسی عملکرد رده‌بندی کننده بیزین در صورت تغییر تعداد ویژگی‌های درزه‌ها، در جدول ۳، تریس ماتریس‌های شکل ۹-۱ الف، تا ۹-د، آورده شده است. به این ترتیب ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد ویژگی‌های درزه‌ها، دقت رده‌بندی کننده بیزین افزایش یافته است. این مسئله طراحی استفاده از رده‌بندی کننده‌های قوی‌تر نسبت به نمودار گل سرخی و استریوت را اثبات می‌کند. در ضمن نکته مهم، تغییر قابلیت رده‌بندی در صورت تغییر نوع ویژگی‌های استفاده شده در رده‌بندی است، که اهمیت توجه به گزینش نوع اطلاعات برداشت از درزه‌ها در صحرا را بیان می‌کند. در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که در مجموعه داده‌های مصنوعی، نوع پُرشدگی، پارامتر مفیدتری برای رده‌بندی بوده تا میزان پُرشدگی، چرا که دقت رده‌بندی در حالت استفاده از ویژگی نوع پُرشدگی برای رده‌بندی، بیشتر از حالتی است که از ویژگی میزان پُرشدگی برای رده‌بندی استفاده شده است. با توجه به ردیف ۱ و ۲ جدول ۳، ملاحظه می‌شود که با افزودن ویژگی میزان پُرشدگی، به ۳ ویژگی شیب، جهت شیب و نوع پُرشدگی، دقت رده‌بندی کننده، تنها ۰/۵ درصد افزایش یافته است، که به وضوح معرف، اهمیت کم ویژگی میزان پُرشدگی برای رده‌بندی در مجموعه داده‌های مصنوعی ساخته شده در بررسی حاضر، است.

برای درک بهتر مزیت استفاده از چند ویژگی برای شناسایی و تفکیک دسته درزه‌ها، در شکل ۱۰، نمودار ۳ بُعدی درزه‌ها در دو حالت ترکیبی از ویژگی‌های درزه‌ها رسم شده است. در شکل ۱۰-الف، از ۳ ویژگی شیب، جهت شیب و میزان پُرشدگی برای رسم موقعیت دسته درزه‌ها استفاده شده است. در اینجا ملاحظه می‌شود که تنها تفکیک دسته درزه‌های ۱ از ۲، و ۳ از ۴، مشکل است. اما در هر صورت تفکیک ۶ دسته درزه می‌تواند صورت بگیرد ((۱ و ۲)، (۳ و ۴)، (۵)، (۶)، (۷) و (۸)). در شکل ۱۰-ب، از ۳ ویژگی شیب، جهت شیب و نوع پُرشدگی برای رسم موقعیت دسته درزه‌ها استفاده شده است. در اینجا نیز ملاحظه می‌شود که تنها تفکیک دسته درزه‌های ۳ از ۵، مشکل است. اما در هر صورت تفکیک ۷ دسته درزه، می‌تواند صورت بگیرد ((۱ و ۲)، (۳ و ۴)، (۵)، (۶)، (۷) و (۸)). همچنان که پیشتر ذکر شد، استفاده از همه ۴ گروه ویژگی‌های درزه‌ها، ۸ دسته درزه مصنوعی را به خوبی شناسایی خواهد کرد، که به دلیل ۴ بُعدی بودن فضا، نمایش گرافیکی آن امکان‌پذیر نیست.

## ۶- نتیجه‌گیری

با وجود آن که در بررسی‌های مهندسی اغلب نزدیک به ۱۰ ویژگی از درزه‌ها در صحرا برداشت می‌شود، بیشتر از دو ویژگی، یعنی شیب و جهت شیب، برای رده‌بندی و معرفی دسته درزه‌ها استفاده نمی‌شود. البته استفاده از ویژگی‌های شیب و جهت شیب برای رده‌بندی درزه‌ها، می‌تواند روش کارآمدی باشد، اما بدیهی است که در مواردی تمامی ویژگی‌های درزه‌های موجود در یک منطقه را نمایش نداده و حتی امکان شناسایی تعداد و ویژگی‌های واقعی دسته درزه‌ها را نیز مهیا نمی‌سازد. در بررسی حاضر ابتدا ۸ دسته درزه مصنوعی با ۴ ویژگی برای هر درزه، تولید شده و سپس نشان داده شد که با استفاده از ۱، ۲ یا ۳ ویژگی درزه‌ها، امکان تفکیک ۸ دسته درزه مصنوعی ساخته شده وجود ندارد. این در حالی است که در صورت استفاده از ۴ ویژگی درزه‌ها، و ضمن بهره‌گیری از رویکرد رده‌بندی بیزین، با دقت ۱۰۰٪ امکان تفکیک دسته درزه‌های ۸ گانه وجود خواهد داشت.

## تشکر و قدردانی

به این وسیله از آقایان دکتر بابک نجار اعرایی دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر

طور معمول، برای بررسی نتیجه عملکرد رده‌بندی کننده، از ماتریسی به نام ماتریس رده‌بندی (confusion matrix)، کمک گرفته می‌شود. سطرهای این ماتریس، معرف رده‌های واقعی و ستون‌های آن معرف رده‌های تصمیم است (در خصوص داده‌های آزمون). بنابراین اگر مقادیر درایه‌های ماتریس در ۱۰۰ ضرب شود، درصد درزه‌های متعلق به رده‌های مقابل به سطر ماتریس که در رده‌های ستون مقابل به درایه مربوطه رده‌بندی شده‌اند، نمایش داده می‌شود. لذا، در ماتریس رده‌بندی، اگر مقدار درایه قطر اصلی، برابر یک باشد، معرف این است که بر اساس الگوریتم رده‌بندی، ۱۰۰٪ درزه‌های آزمون یک دسته درزه خاص، در همان دسته رده‌بندی شده‌اند. و هر چه مقادیر درایه‌های قطر اصلی، از یک کوچک‌تر باشند، معرف وجود خطای بیشتر در رده‌بندی است. توجه شود که در این حالت، بدون شک خطا در رده‌بندی وجود داشته است. برای مثال در شکل ۹-الف، ماتریس رده‌بندی روش بیزین، در حالتی که از هر ۴ ویژگی درزه‌ها برای رده‌بندی آنها استفاده شده، آورده شده است. همچنان که در این شکل مشاهده می‌شود، کلیه درایه‌های قطر اصلی برابر یک، و دیگر درایه‌ها برابر صفر هستند. مفهوم شکل ۹-الف این است که بر اساس ۴ ویژگی ساخته شده، امکان جدایش و شناخت کلیه دسته درزه‌های ۸ گانه وجود خواهد داشت و دقت رده‌بندی ۱۰۰٪ است. روش مناسبی که برای بررسی دقت عملکرد رده‌بندی کننده وجود دارد این است که مجموع درایه‌های قطر اصلی ماتریس (تریس (trace) ماتریس) را محاسبه کنیم. هر چه تریس ماتریس، به تعداد رده‌ها (در اینجا دسته درزه‌ها)، نزدیک‌تر باشد، معرف عملکرد بهتر رده‌بندی کننده است. در شکل ۹-الف، ملاحظه می‌شود که تریس ماتریس رده‌بندی، برابر ۸ است. به این معنی که دقت رده‌بندی ۱۰۰٪ است.

برای درک اهمیت استفاده از تمامی ویژگی‌های درزه‌ها در رده‌بندی آنها، در شکل ۹، ماتریس رده‌بندی برای حالتی که از ۲ یا ۳ ویژگی درزه‌ها برای رده‌بندی آنها استفاده شده، آورده شده است. در شکل ۹-ب، ماتریس رده‌بندی در حالت استفاده از ۳ ویژگی جهت شیب، شیب و میزان پُرشدگی برای رده‌بندی دسته درزه‌ها آورده شده است. در اینجا ملاحظه می‌شود که بیشترین خطا، در رده‌بندی دسته درزه‌های ۳ و ۴ رخ داده است. همچنین کلاً در رده‌بندی دسته درزه‌های ۵، ۶، ۷ و ۸، خطا به صفر کاهش یافته است. در شکل ۹-ج، ماتریس رده‌بندی در حالت استفاده از ۳ ویژگی جهت شیب، شیب و نوع پُرشدگی برای رده‌بندی دسته درزه‌ها آورده شده است. در اینجا نیز ملاحظه می‌شود که تنها در رده‌بندی دسته درزه‌های ۳ و ۵ خطا رخ داده است. بر اساس ماتریس رده‌بندی شکل ۹-ج، می‌توان بیان کرد که ترکیب سه ویژگی جهت شیب، شیب و نوع پُرشدگی، برای رده‌بندی دسته درزه‌های مصنوعی ۸ گانه، بسیار مطلوب پاسخ داده است. شکل ۹-د، ماتریس رده‌بندی برای حالتی که تنها از دو ویژگی جهت شیب و شیب برای رده‌بندی استفاده شده، آورده شده است. تریس ماتریس رده‌بندی در شکل ۹-د، برابر ۶/۲۴ است. به این معنی که بعضی از داده‌های آزمون متعلق به دسته درزه‌های ۸ گانه، در دسته درزه‌های دیگر (یعنی به اشتباه)، رده‌بندی شده‌اند. در این حالت دقت رده‌بندی برابر ۷۸٪ است (۶/۲۴ تقسیم بر ۸ ضربدر ۱۰۰). برای مثال، ضمن توجه به سطر اول ماتریس رده‌بندی شکل ۹-د، ملاحظه می‌شود که ۸۶٪ درزه‌های آزمون دسته درزه ۱، در دسته درزه ۱، رده‌بندی شده‌اند. این در حالی است که ۱۴٪ از درزه‌های دسته درزه ۱، در دسته درزه ۲ رده‌بندی شده‌اند. توجه شود که این با شکل‌های ۶-ب و ۸-الف نیز کاملاً سازگار است. چرا که دسته درزه‌های ۱ و ۲ با هم همپوشانی داشته و غیر قابل تفکیک بودند. برای مثالی دیگر، به سطر ۴ از ماتریس رده‌بندی شکل ۹-د توجه شود. ۲۲٪ از درزه‌های آزمون دسته درزه ۴، در دسته درزه ۳ و ۱۲٪ در دسته درزه ۵، رده‌بندی شده‌اند. تنها ۶۶٪ درزه‌های دسته درزه ۴ به طور صحیح در دسته درزه ۴ رده‌بندی شده‌اند. دوباره توجه شود که این موضوع نیز با شکل‌های ۶-ب و ۸-الف به طور

همچنین از مساعدت‌های شرکت مهندسی و توسعه نفت ایران (متن) کمال تشکر را دارد.

دانشگاه تهران که کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزنده‌ای در طول این تحقیق داشته‌اند، بخش ژئوتکنیک شرکت مهندس مهتاب قدس به دلیل ارایه مشورت‌های ارزنده و

جدول ۲- ویژگی‌های جهت شیب، شیب، میزان پُرشدگی و نوع پُرکننده ۸ دسته درزه مصنوعی ساخته شده

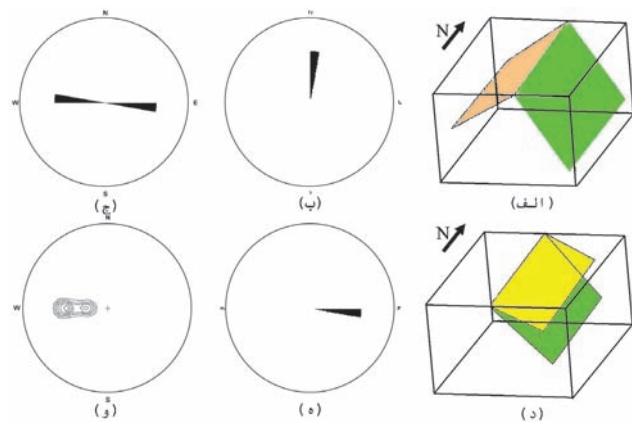
ردۀ درز و ویژگی	میزان پُرشدگی							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱ جهت شیب (درجه)	۲۰-۸۰	۲۰-۷۰	۷۰-۱۵۰	۷۵-۱۶۰	۹۰-۱۶۵	۱۹۰-۲۷۰	۱۸۰-۲۷۰	۲۳۰-۳۱۵
۲ شیب (درجه)	۵۰-۷۵	۳۵-۷۰	۲۰-۴۵	۲۵-۵۰	۴۰-۷۰	۳۰-۵۵	۳۵-۶۵	۵۰-۸۰
۳ میزان پُرشدگی	۱	۱	۱	۱	۰/۵	۱	۰	۱
۴ نوع پُرکننده	۱	۰/۵	۱	۰/۵	۱	۱	۰	۰/۵

جدول ۱- کمی سازی ویژگی‌های میزان پُرشدگی و نوع پُرکننده درزه‌های مصنوعی ساخته شده

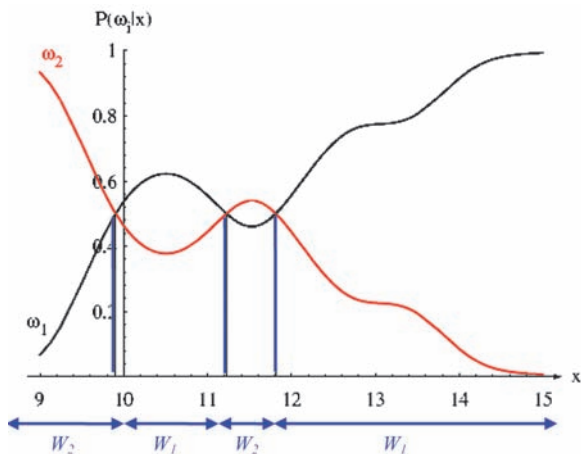
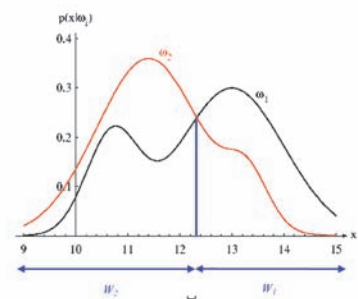
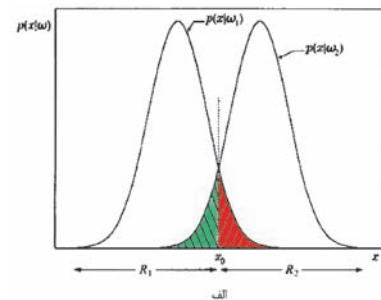
میزان پُرشدگی		نوع پُرکننده	
خالی	۰	خالی	۰
نیمه پُر	۰/۵	رس	۰/۵
پُر	۱	کلسیت	۱

جدول ۳- بررسی نحوه تغییر عملکرد دسته‌بندی کننده بیزین نسبت به تغییر تعداد و نوع ویژگی‌های درزه‌ها که در دسته‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

ردۀ درز و ویژگی	تعداد ویژگی‌های استفاده شده برای رده‌بندی	ویژگی‌هایی از درزه‌ها که برای رده‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌اند	تریس ماتریس رده‌بندی	دقت رده‌بندی (%)
۱	۴	شیب، جهت شیب، نوع پُرکننده، میزان پُرشدگی	۸	۱۰۰
۲	۳	شیب، جهت شیب، نوع پُرکننده	۷/۹۶	۹۹/۵
۳	۳	شیب، جهت شیب، میزان پُرشدگی	۷/۱۸	۹۰
۴	۲	شیب، جهت شیب	۶/۲۴	۷۸

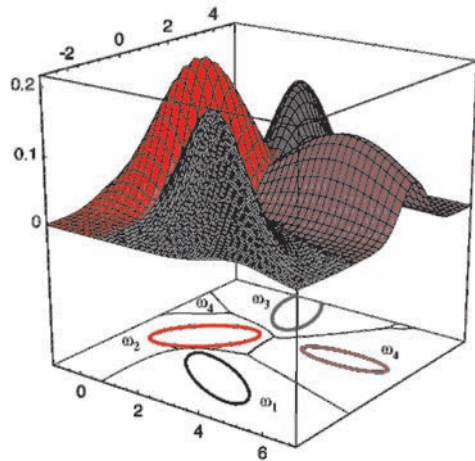


شکل ۱- الف) دو درزه با امتداد یکسان اما جهت شیب متفاوت، ب) نمودار گل سرخی امتدادی دو درزه (الف)، ج) نمودار گل سرخی جهت شیبی دو درزه (الف)، د) دو درزه با امتداد و جهت شیب یکسان، تفاوت این دو درزه در اندازه شیب آنهاست. ه) نمودار گل سرخی جهت شیب دو درزه (ب)، و) تصویر استریوگرافیک دو درزه (ب).

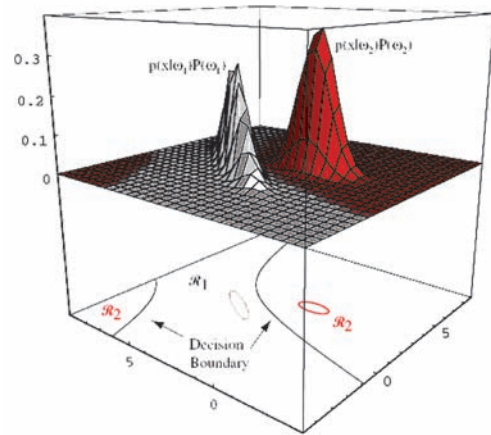


شکل ۲- افزایش فضای تصمیم بر اساس احتمال شرطی، الف) در حالتی که توزیع احتمال شرطی گوسی است (Duda et al., 2003) ب) در حالتی که توزیع احتمال شرطی گوسی نیست (Theodoridis & Koutroumbos, 2002)

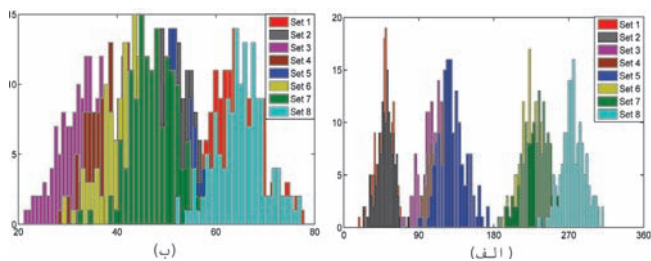
شکل ۳- توالی فضای تصمیم بر اساس احتمال شرطی (Duda et al., 2003)



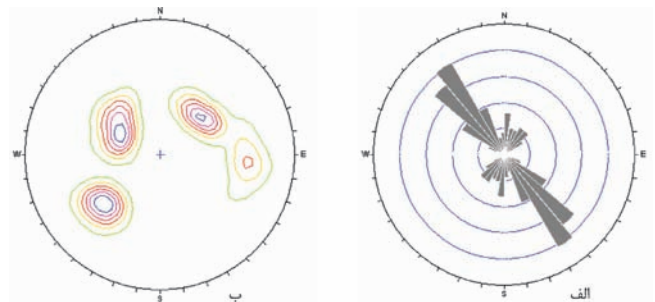
شکل ۵- رده‌بندی بیز در حالتی که چهار رده در فضای دو بعدی (دو متغیر شرطی کننده) وجود دارند (Duda et al., 2003)



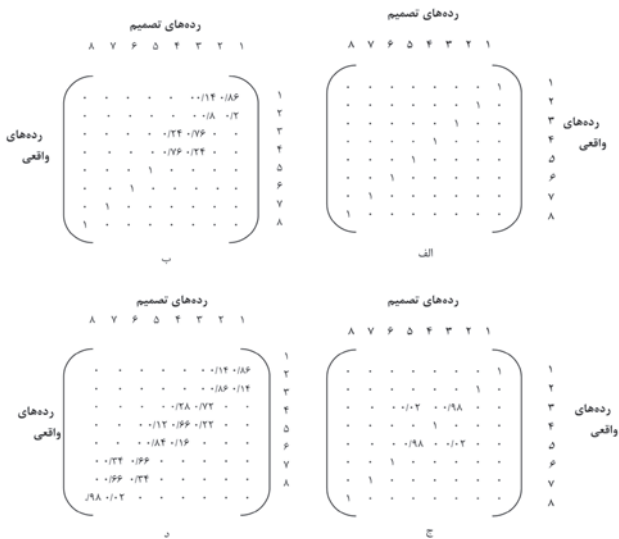
شکل ۴- رده‌بندی بیزین در حالتی که دو متغیر شرطی ساز وجود دارند (Duda et al., 2003)



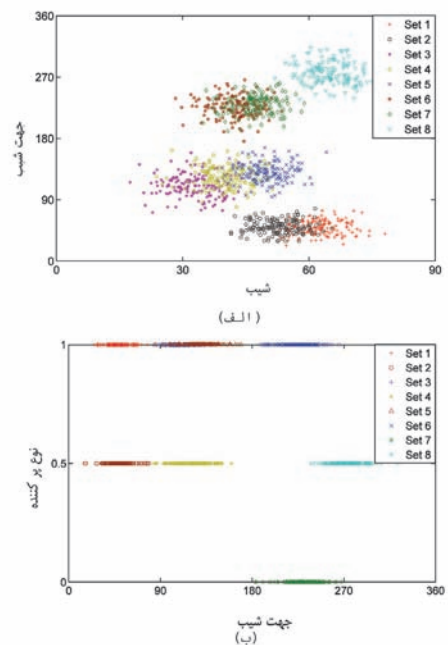
شکل ۷- توزیع فراوانی ویژگی‌های دسته درزه‌های هشت گانه (الف) جهت شیب و (ب) شیب



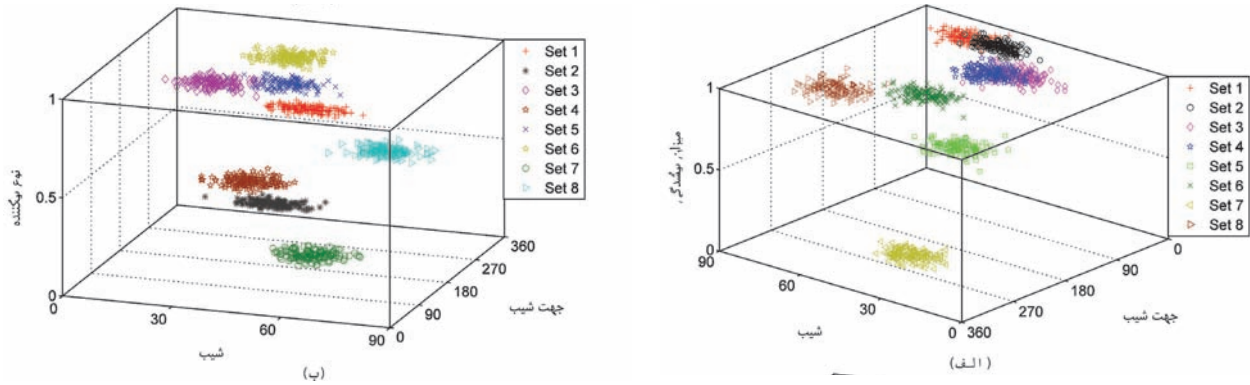
شکل ۶- نمودار گل سرخی درزه‌های مصنوعی ساخته شده، (ب) تصویر استریوگرافیک درزه‌های مصنوعی ساخته شده



شکل ۹- ماتریس دسته‌بندی رویکرد بیزین. الف) در حالتی که از هر ۴ ویژگی درزه‌ها برای رده‌بندی استفاده شده است. ب) در حالتی که تنها از ۳ ویژگی شیب، جهت شیب و میزان پرشدگی درزه‌ها برای رده‌بندی استفاده شده است. ج) در حالتی که تنها از ۳ ویژگی شیب، جهت شیب و نوع پرکننده درزه‌ها برای رده‌بندی استفاده شده است. د) در حالتی که تنها از ۲ ویژگی شیب و جهت شیب درزه‌ها برای رده‌بندی آنها استفاده شده است.



شکل ۸- نمودارهای دوبعدی تمرکز ویژگی‌های دسته درزه‌های ۸ گانه بر اساس دو ویژگی (الف) شیب و جهت شیب، (ب) جهت شیب و نوع پرکننده.



شکل ۱۰- الف) نمودار سه‌بعدی تمرکز ویژگی‌های دسته درزه‌های ۸ گانه بر اساس تغییرات سه ویژگی شیب، جهت شیب و میزان پُرشدگی. ب) نمودار سه‌بعدی تمرکز ویژگی‌های دسته درزه‌های ۸ گانه بر اساس تغییرات سه ویژگی شیب، جهت شیب و نوع پُرکننده، ۷ دسته درزه را تفکیک کرده‌است.

### References

- Bishop, C. M., 1997- Neural Networks for Pattern Recognition, Oxford University Press, 492 p.
- Duda, R., Hart, P., Stork, D., 2003- Pattern Classification, Second Edition, John Wiley, 738 p.
- Hammah, R. E., Curran, J. H., 1998- Fuzzy Cluster Algorithm for the Automatic Identification of Joint Sets, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35, No. 7, pp. 889-905.
- Jimenez-Rodriguez, R., Sitar, N., 2006- A Spectral Method for Clustering of Rock Discontinuity Sets, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, pp. 1052-1061.
- Marcotte, D., Henry, E., 2002- Automatic Joint Set Clustering Using a Mixture of Bivariate Normal Distribution, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, pp. 323-334.
- Memarian, H., Fergusson, C. L., 2003- Multiple fracture sets in the southeastern Permian-Triassic Sydney Basin, New South Wales, Australian Journal of Earth Sciences, Vol. 50, PP. 49-61.
- Neville, J., 1968- Fault and Joint development in Brittle and Semi Brittle Rock, Pergamon Press, 530 p.
- Sirat, M., Talbot, C. G., 2001- Application of Artificial Neural Networks to Fracture Analysis at the Aspö HRL, Sweden: Fracture Sets Classification, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, pp. 621-639.
- Theodoridis, S., Koutroumbos, K., 2002- Pattern Classification, Second Edition, Elsevier Academic Press, 710 p.
- Webb, A. R., 2002- Statistical Pattern Recognition, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, 504.