



## مدل سازی شکستگی های مخزن آسماری میدان پازنان با استفاده از نرم افزار Petrel

صدیقه ایزدی<sup>۱</sup>، ابراهیم شریفی دارانی<sup>۲</sup> • شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

### چکیده

توصیف و تعیین دقیق مشخصات شبکه‌ی شکاف برای تمامی مراحل مدیریت مخزن (اعم از حفاری)، تعیین محل چاه‌ها، شبیه‌سازی، تکمیل و طراحی پروفایل تولید اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله مطالعه‌ای موردی برای توضیح روش جمع‌بندی اطلاعات به‌منظور دستیابی به متغیرهای مورد نیاز در شبیه‌سازی شکستگی‌های مخزن انجام شده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Petrel روندی کلی نیز برای مدل‌سازی استاتیک مخازن شکافدار ارائه شده است. شیوه‌ی کار مورد استفاده در این مطالعه بدین ترتیب است که ابتدا به‌منظور شناسایی سیستم‌های مختلف شکستگی، آنالیز آماری اطلاعات انجام شده و نمودار شدت شکاف خوردگی برای هر دسته شکستگی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از متغیرهای مختلف زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و ساختمانی به‌عنوان متغیرهای هادی، متغیرهای شکستگی مدل‌سازی می‌شوند. در انتها با استفاده از مدل شبکه‌ی شکاف و افزایش مقیاس آن به شبکه‌ی سه‌بعدی مخزن، خواص شکاف محاسبه می‌شوند. بر اساس نتایج این مطالعه، صرف‌نظر از شدت شکاف خوردگی، شکاف‌ها در تمامی نواحی گسترش دارند. ناحیه‌ی ۱- بیشترین و نواحی ۷- و ۶- کمترین شدت شکاف خوردگی را دارند. میانگین تخلخل شکاف به‌دست آمده در این مطالعه ۰/۲ درصد و میانگین مقادیر نفوذپذیری مؤثر شکاف به‌دست آمده در جهات X، Y و Z نیز به‌ترتیب ۱۷۶۸، ۲۲۱۵ و ۲۷۳۳ میلی‌داریسی است.

### اطلاعات مقاله

\* دریافت:

۹۴/۲/۱۴

\* پذیرش:

۹۴/۲/۲۳

\* ارسال برای چاپ:

۹۴/۱۱/۲۰

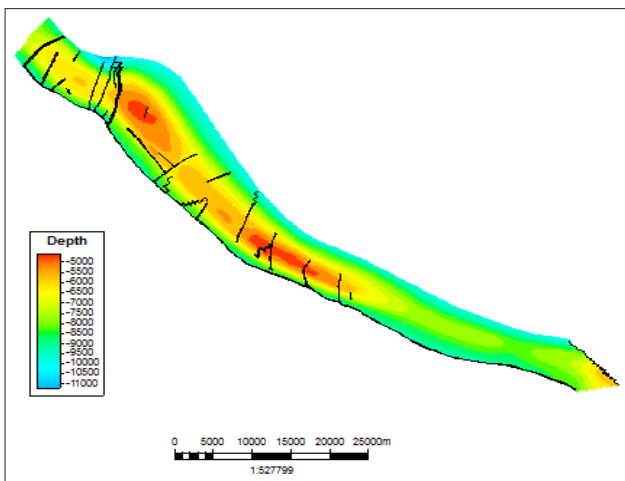
### واژگان کلیدی

شدت شکاف خوردگی  
متغیرهای هادی  
اطلاعات نقطه‌ای شکستگی  
فراوانی شکاف  
تراکم خطی

### مقدمه

مرکزی به‌سمت داخل ساختمان از شیب آن کاسته می‌شود [۱]. علاوه بر گسل معکوس و بزرگی که در امتداد یال جنوبی وجود دارد گسل‌های نرمال نیز در ساختمان پازنان تأثیر داشته‌اند. این گسل‌ها بیشتر روی یال جنوبی که شیب تندتری دارد به‌وجود آمده‌اند (شکل-۱).

مقاله‌ی حاضر برگرفته از مطالعه‌ای است که با هدف بررسی توانایی‌های نرم‌افزار Petrel در مدل‌سازی شکستگی‌ها انجام شده است.



شکل ۱ | روند کلی و محل گسل‌ها در ساختمان تاقدیس میدان پازنان

وجود شکستگی‌ها در اکثر رخنمون‌ها موضوعی کاملاً معمول است. این بدان معنی است که احتمالاً بیشتر مخازن نفت و گاز جهان تحت تأثیر این پدیده قرار دارند. شکستگی‌های طبیعی می‌توانند سبب ناهمگنی یا ناهمسانی زیادی در مخازن شده و بر جریان سیال اثر بگذارند. بنابراین در توسعه و مدیریت مخازن، توصیف دقیق شبکه‌ی شکستگی‌های مخزن اهمیت فراوانی دارد.

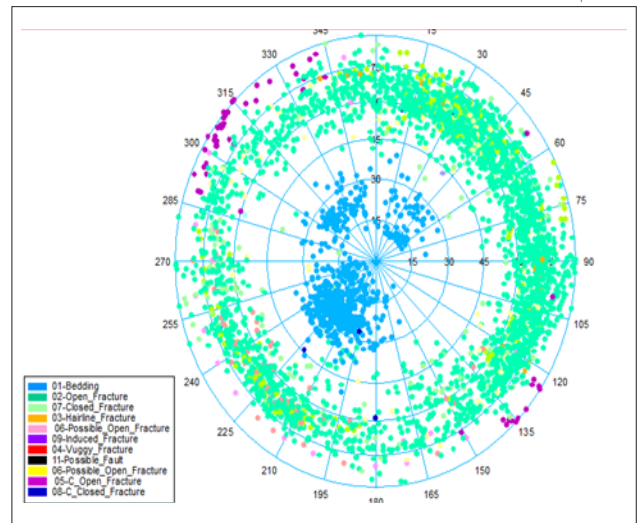
از مطالعات پیشین انجام شده در این زمینه می‌توان مطالعه‌ی شبیه‌سازی مخزن آسماری میدان پازنان و فاز تعیین مشخصات مطالعه‌ی جامع مخزن آسماری (بخش مطالعه‌ی شکستگی‌ها) را نام برد. در تحقیق نخست، برای مطالعه‌ی شکستگی‌ها از هر دو روش مستقیم و غیرمستقیم استفاده شده است. این مطالعه با تکیه بر اطلاعات محدود مغزه و اطلاعات دینامیکی انجام شده است. اما در مطالعه‌ی دوم علاوه بر اطلاعات مذکور، از داده‌های استاتیک شامل اطلاعات نمودارهای تصویری و ساختارها نیز استفاده شده که برای این منظور نرم‌افزار Fraca flow جهت مدل‌سازی شکستگی‌های مخزن به کار رفته است.

ساختمان تاقدیسی نامتقارن میدان پازنان با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی در ناحیه‌ی جنوب‌غربی ایران قرار دارد. شیب این ساختمان در یال جنوبی نسبت به یال شمالی تندتر بوده و در ناحیه‌ی

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (sedighehizadi.83@gmail.com)

### ۱- تجزیه و تحلیل داده‌ها

طی این مرحله، اطلاعات نقطه‌ای شکستگی‌ها پس از بارگذاری در نرم‌افزار، بر اساس شیب و جهشان دسته‌بندی شدند و در نتیجه چهار دسته شکستگی شناسایی شد: یک دسته شکستگی طولی، دو دسته شکستگی مورب و یک دسته شکستگی عرضی. آنالیز آماری داده‌های شکستگی به روش Fisher انجام شد. در شکل ۲- وضعیت شیب و جهت شیب شکستگی‌ها به وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در این مطالعه جهت فراهم کردن امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها، انواع شکستگی‌ها اعم از باز یا بسته و سایر پدیده‌های مشاهده شده در مغزه‌ها و نمودارهای تصویری در نرم‌افزار بارگذاری شد. به‌طور کلی دسته‌ی شکستگی‌های طولی

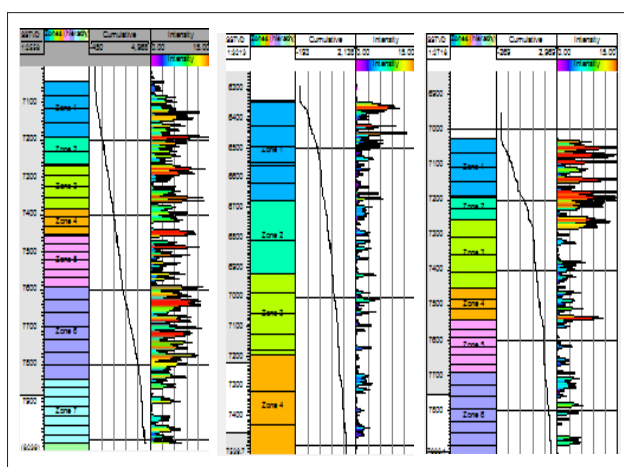


شکل ۲ | نمایش اطلاعات نقطه‌ای شکستگی‌ها در مخزن آسماری میدان پازنان

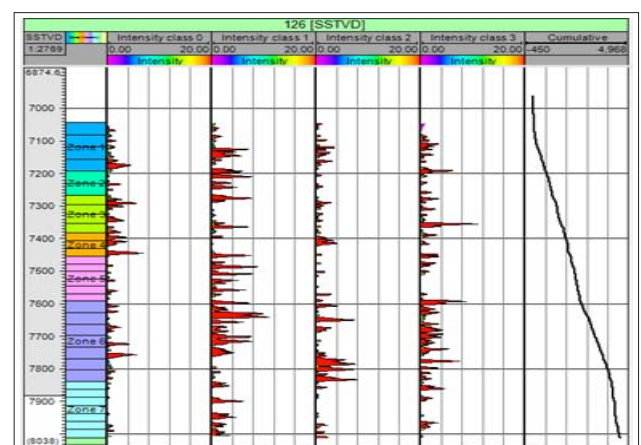
(با آزیموت ۱۳۰ درجه‌ی شمالی-شرقی) فراوان‌ترین نوع شکاف در سازند آسماری هستند [۲]؛ میدان پازنان نیز از این موضوع مستثنی نیست و این شکاف‌ها نسبت به سایر شکستگی‌ها فراوانی بیشتری دارند. این شکستگی‌ها در واقع همان شکستگی‌های محوری<sup>۱</sup> هستند که موازی با محور چین تشکیل می‌شوند. در میدان پازنان از نظر فراوانی پس از شکستگی‌های با امتداد N130، دسته‌ی شکستگی‌های با امتداد شمال-جنوب رتبه‌ی دوم را دارند. این دسته از شکاف‌های مورب نیز مرتبط با گسل هستند و بنابراین علاوه بر حضور در تمامی چاه‌های میدان، بیشترین فراوانی را در چاه‌های واقع در بال جنوبی میدان دارند.

در نرم‌افزار Petrel، به‌جای متغیر تراکم شکاف از متغیر شدت شکاف خوردگی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود [۳]. نمودار شدت شکاف خوردگی برای هر کدام از دسته شکستگی‌های شناسایی شده، به تفکیک محاسبه گردید (شکل ۳- و به روش arithmetic به سلول‌های شبکه‌ی مخزن افزایش مقیاس داده شد. برای محاسبه‌ی ضخامت نواحی مکانیکی نمودار تجمعی شدت شکاف خوردگی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴- مشخص است در اغلب چاه‌ها ناحیه‌ی ۱- از لحاظ شدت شکاف خوردگی بهترین وضعیت را دارد. نقشه‌ی تراکم شکستگی نیز برای نواحی مختلف تهیه شد تا بتوان وضعیت تقریبی هر ناحیه را از لحاظ مقدار شکاف خوردگی بررسی کرد.

از آنجا که لیتولوژی سازند آسماری در این میدان عمدتاً کربناته است نبود اطلاعات نوع سنگ و رخساره تأثیر چندانی در دقت مدل ندارد.



شکل ۳ | بررسی همبستگی چاه‌های دارای نمودار تصویری میدان پازنان از نظر شدت شکاف خوردگی



شکل ۴ | نمودارهای شدت شکاف خوردگی و شدت شکاف خوردگی تجمعی محاسبه شده برای هر کدام از دسته‌های شکستگی یکی از چاه‌های میدان پازنان

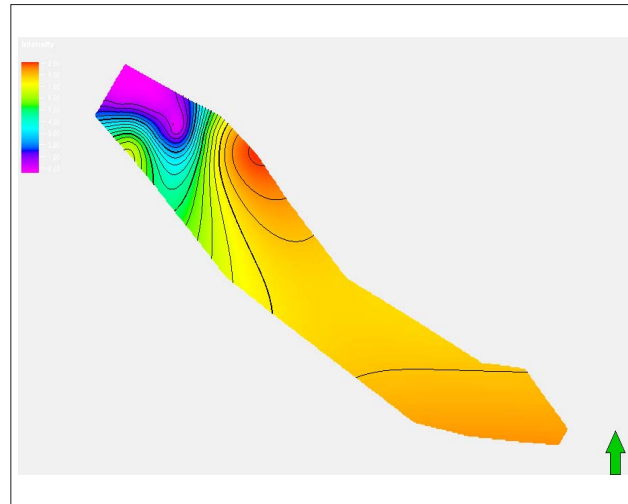


## ۲- مدل سازی متغیرهای شکستگی

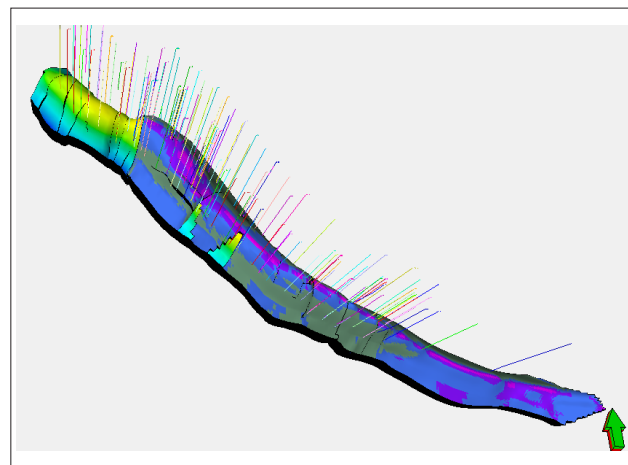
مدل زمین شناسی مخزن آسماری قبلاً با استفاده از نرم افزار Petrel ساخته شده که در آن سازند آسماری به هشت ناحیه تقسیم گردیده که ناحیه ۱- دارای یک زیرناحیه است (شکل-۶).

در این مطالعه برای مدل سازی شدت شکاف خوردگی در بین چاه ها، جایی که اطلاعات مستقیمی از وضعیت شکستگی مخزن در دست نیست، از روش شبکه های عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> استفاده شد. بدین منظور ابتدا اطلاعات مورد نیاز از جمله گرید سه بعدی، متغیرهای هادی (خواص ثانویه<sup>۴</sup>) و متغیر ناظر برای هر دسته شکستگی تعیین می گردد و شبکه ای عصبی مورد نظر آموزش داده می شود.

قبل از آغاز آموزش شبکه ای عصبی، در بخش آنالیز همبستگی<sup>۵</sup> مقدار همبستگی متغیرهای هادی مختلف با متغیر هدف (شدت



شکل ۵ نقشه ی دوبعدی تراکم شکستگی برای ناحیه ی ۱- مخزن آسماری میدان پازنان



شکل ۶ مدل سه بعدی مخزن آسماری میدان پازنان

شکاف خوردگی) بررسی شده و بهترین متغیرها به عنوان متغیرهای هادی انتخاب می شوند (شکل-۷). در این مطالعه برای هر دسته شکستگی سه متغیری که بیشترین ضریب همبستگی را با شدت شکاف خوردگی دسته ی مربوطه داشتند به عنوان متغیرهای هادی انتخاب و در مدل سازی شدت شکاف خوردگی آن دسته استفاده شدند.

متغیرهای هادی انتخاب شده برای هر دسته شکستگی به قرار زیر بوده اند:

■ دسته ی شکستگی های class 0 (با امتداد NI130): فاصله از ستیغ، فاصله از گسل و شاخص تولید

■ دسته ی شکستگی های با امتداد class 1 (با امتداد N-S): حداکثر تولید، شیب ساختمانی و شاخص تولید

■ دسته ی شکستگی های با امتداد class 2 (با امتداد E-W): حداکثر تولید، نمودار نگار تولید و شیب ساختمانی

■ دسته ی شکستگی های با امتداد class 3 (با امتداد N040): حداکثر تولید، شاخص تولید و هرزروی گل

بدین ترتیب، متغیر هدف در بخش هایی از میدان که اطلاعات شکستگی حاصل از نمودارهای تصویری موجود نیست محاسبه شده و پس از کنترل کیفیت، به عنوان ورودی در مرحله ی ساخت شبکه ی شکاف استفاده خواهد شد. با استفاده از رسم نمودار اطلاعات مورد استفاده برای آموزش شبکه ای عصبی بر حسب نتایج تولیدی، کنترل کیفیت نتایج انجام می شود (شکل-۷). این کار برای هر دسته

	PLT	PI	ML	Distance from Faults	max rate	Max curvature	Gaussian curvature	Min curvature	Dip angle	Intensity class 0
PLT	1.000	0.674	0.020	0.047	0.444	0.007	0.026	0.000	0.022	0.229
PI	0.674	1.000	0.757	0.044	0.291	0.074	0.000	0.027	0.221	0.210
ML	0.020	0.757	1.000	0.027	0.255	0.146	0.017	0.000	0.040	0.059
Distance from Faults	0.047	0.044	0.027	1.000	0.074	0.040	0.040	0.020	0.175	0.000
max rate	0.444	0.291	0.255	0.074	1.000	0.046	0.026	0.000	0.287	0.000
Max curvature	0.007	0.074	0.146	0.040	0.046	1.000	0.000	0.070	0.796	0.187
Gaussian curvature	0.026	0.000	0.017	0.040	0.026	0.000	1.000	0.000	0.760	0.187
Min curvature	0.000	0.027	0.000	0.020	0.000	0.070	0.000	1.000	0.070	0.174
Dip angle	0.022	0.221	0.040	0.175	0.287	0.796	0.760	0.070	1.000	0.187
Total	0.254	0.044	0.057	0.074	0.001	0.000	0.074	0.046	0.070	0.000

شکل ۷ بررسی مقدار همبستگی متغیرهای مختلف زمین شناسی و ساختمانی با متغیر شدت شکاف خوردگی برای دسته ی شکستگی های با امتداد class 0 (NI130)

دسته‌ی شکستگی‌های با امتداد N-S، در محدوده‌ی شمال، غرب و مرکز مخزن گسترش خوبی دارند و بیشترین ضریب همبستگی را با حداکثر تولید روزانه نشان می‌دهند. نتیجه‌ی مطالعه‌ی اخیر این دسته شکستگی نیز مؤید همین مطلب است.

دسته‌ی شکستگی‌های E-W نیز فقط در یال شمالی تاقدیس پازنان و در محدوده‌ی چاه‌های ۱۲ و ۹ و ۷ دیده می‌شوند. این نحوه‌ی توزیع می‌تواند بیشتر متأثر از حداکثر تولید روزانه‌ی چاه‌ها به‌عنوان عامل شکستگی با بیشترین ضریب همبستگی باشد؛ چراکه این چاه‌ها در مقایسه با سایر چاه‌ها بهترین وضعیت تولید را داشته‌اند.

توزیع شدت شکاف خوردگی مربوط به دسته‌ی شکستگی N040 به‌صورت محلی در بخش مرکزی و شمال‌غربی مخزن و در هر دو یال دیده می‌شود. برای این دسته نیز مشابه دو دسته‌ی شکستگی N-S و E-W، حداکثر تولید، بیشترین ضریب همبستگی و بنابراین بیشترین تأثیر را بر نحوه‌ی توزیع آنها داشته است.

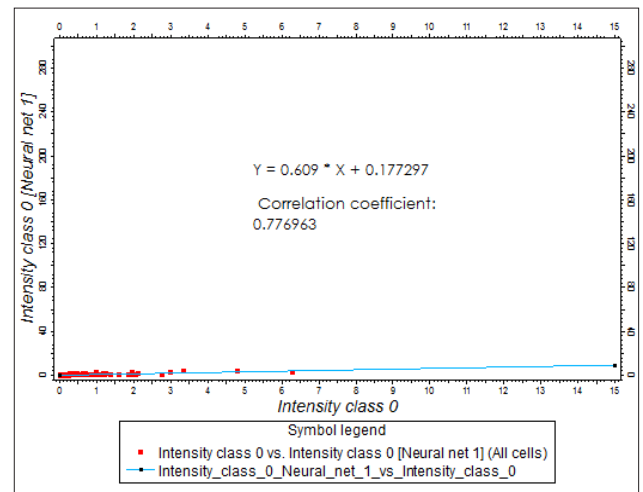
### ۳- ساختن شبکه‌ی شکاف گسسته<sup>۶</sup>

یک محدودیت در مدل‌سازی شکستگی گسسته به‌شیوه‌ی سنتی آنست که تعداد شکاف‌هایی که باید در میدان مدل‌سازی شوند بسیار زیاد است. به‌دلیل محدودیت‌های حافظه‌ی سیستم، اغلب، تلاش برای گنجاندن همه‌ی آنها به‌صورت صریح<sup>۷</sup> در مدل کار دشواری است. با این وجود برای توصیف تغییرات در شبکه‌ی شکاف بسیار خوب عمل می‌کنند. در نرم‌افزار Petrel این امکان وجود دارد که مدلی به‌صورت ترکیبی از شبکه‌ی شکستگی‌های گسسته و مدل شکستگی ضمنی<sup>۸</sup> ساخته شود. جایی که شکاف‌های بزرگ و مهم‌تر به‌صورت صریح و سایر شکاف‌ها (شکاف‌های کوچک‌تر) به‌صورت ضمنی در قالب خواص گرید نمایش داده می‌شوند. خواص پیوسته‌ی گرید بسیار کاربردی بوده و کار کردن با آنها آسان است اما اغلب مانند شکاف‌های صریح توصیفی نیستند.

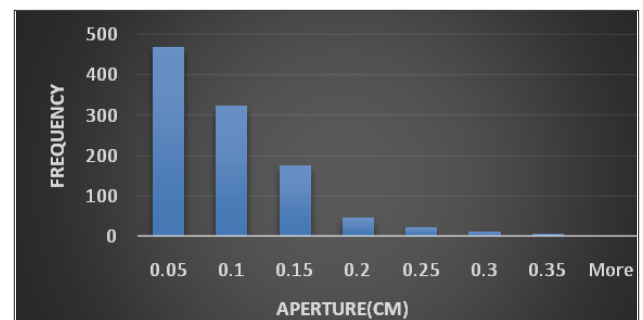
۱   خواص شکاف حاصل از مدل‌سازی شکستگی‌های مخزن آسماری میدان پازنان	
Property (avg)	value
Phi (Fraction)	0.002
Ki (md)	1768
Kj (md)	2215
Kz (md)	2733
Sigma	0.227

شکستگی به‌تفکیک انجام گردید.

نتایج نشان می‌دهد که دسته‌ی شکستگی‌های با امتداد N130 بیشتر در یال شمالی و نزدیک به ستیغ مخزن گسترش دارند. این موضوع با ماهیت این نوع شکاف‌ها که تحت تأثیر چین‌خوردگی تشکیل می‌شوند بی‌ارتباط نیست؛ چراکه بر اساس تجزیه و تحلیل گسل‌ها، یال شمالی کمتر تحت تأثیر گسل خوردگی قرار گرفته و بنابراین اگر شکستگی در آن ایجاد شده باشد، ناشی از چین‌خوردگی است. نکته‌ی جالب توجه در این نقشه، حضور این شکستگی‌ها در بخش شرقی مخزن در محدوده‌ی چاه‌های ۱۳ تا ۲۰ است. در این دسته، تغییری که بیشترین ضریب همبستگی را داشته فاصله از ستیغ بوده که کاملاً با نتایج حاصل هم‌خوانی دارد؛ چراکه فراوانی این شکاف‌ها با کاهش فاصله از ستیغ کاهش می‌یابد. این در حالی است که در آخرین مطالعه‌ی شکستگی انجام شده، نقشه‌ی تراکم این دسته از شکستگی‌ها حضور آنها در تمامی مخزن را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۸ | نحوه‌ی کنترل کیفیت شبکه‌ی عصبی ساخته شده به‌منظور مدل‌سازی متغیر شدت شکاف خوردگی برای یکی از چاه‌های میدان پازنان برای دسته شکستگی‌های با امتداد class 0 (N130)



شکل ۹ | نمودار فراوانی آماری باز شدگی دهانه‌ی شکستگی‌ها در یکی از چاه‌های میدان



نبودن اطلاعاتی از طول شکاف‌ها در میدان پازنان، طول صفحات شکستگی به صورت تقریبی و با توجه به مطالعات انجام شده روی رخنمون‌های سازند آسماری در جنوب غرب ایران به نرم‌افزار داده شد. همچنین، توزیع متغیر بازشدگی دهانه‌ی شکستگی‌ها بر اساس مقادیر حاصل از تفسیر نمودار تصویری مربوط به یکی از چاه‌ها در نرم‌افزار وارد گردید. البته این مقدار باید قبلاً با مقادیر حاصل از مغزه‌ها نیز کالیبره شده باشد. لازم به ذکر است که در این مطالعه همبستگی بازشدگی دهانه‌ی شکستگی‌ها با طول آنها در نظر گرفته نشده است.

بدین ترتیب پس از افزایش مقیاس شبکه‌ی شکاف ساخته شده، تخلخل و نفوذپذیری آن و ضریب انتقال بین ماتریس و شکاف برای هر سلول محاسبه شد (جدول-۱).

#### نتیجه‌گیری

نرم‌افزار Petrel برای توزیع متغیرهای شکستگی در گرید سه بعدی و همچنین ساخت شبکه‌ی شکاف، الگوریتم‌های متنوعی دارد که روش شبکه‌های عصبی یکی از آنهاست.

■ صرف نظر از شدت شکاف خوردگی، شکستگی‌ها در تمامی نواحی مخزن آسماری میدان پازنان گسترش دارند. ناحیه‌ی ۱- بیشترین و نواحی ۶ و ۷ کمترین شدت شکاف خوردگی را دارند که این موضوع با توجه به افزایش فاصله‌ی بین شکستگی‌ها با افزایش عمق، قابل توجیه است.

■ میانگین تخلخل شکاف به دست آمده در این مطالعه ۰/۲ درصد است.

■ میانگین مقادیر نفوذپذیری مؤثر شکاف به دست آمده در جهات X، Y و Z به ترتیب برابر ۱۷۶۸، ۲۲۱۵ و ۲۷۳۳ میلی داری است.

■ بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه تخلخل شکاف، به طور میانگین کمتر از یک درصد تخلخل کل را تشکیل می‌دهد.

نشان‌گرهای مدل شکاف‌های ضمنی (IFM)، بیانگر مقادیر میانگین توزیع‌های متغیرهای آماری به ازای هر سلول از گرید، به علاوه‌ی دو خاصیت  $\frac{\text{مساحت کل شکاف‌ها}}{\text{حجم}}$  و  $\frac{\text{مساحت شکاف‌های Implicit}}{\text{حجم}}$  است که به ترتیب بیانگر تراکم شکاف کل مدل ترکیبی و تراکم مدل IFM هستند.

به منظور ساختن مدل ترکیبی شکاف، متغیری طولی به نام حداکثر طول شکاف‌های ضمنی<sup>۹</sup> تعریف می‌شود. این متغیر، آستانه‌ی جدایی است که تعیین می‌کند کدام شکاف‌ها به صورت صریح یا ضمنی مدل‌سازی شوند. تمامی شکاف‌های با طول بین صفر و آستانه‌ی مفروض، به صورت ضمنی مدل‌سازی می‌شوند (شکاف‌ها به صورت خواص شبکه نمایش داده می‌شوند)؛ در حالی که شکاف‌های با طول بین این آستانه و حداکثر طول شکاف‌ها در مدل به صورت صفحات صریح در نظر گرفته می‌شوند.

ساختن مدل DFN به دو روش قطعی<sup>۱۰</sup> و احتمالی<sup>۱۱</sup> انجام می‌گردد. در این مطالعه ترکیبی از هر دو روش به ترتیب برای مدل‌سازی گسل‌ها و دسته‌های مختلف شکستگی استفاده شده است.

در این مرحله برای ساختن شبکه‌ی شکاف، اطلاعات تراکم شکستگی، محاسبه شده، برای دسته‌های مختلف شکستگی در مرحله‌ی قبل، شکل صفحات شکستگی به صورت مربعی و با نسبت اضلاع ۰/۶، توزیع طول شکاف‌ها به صورت توانی با حداکثر طول شکاف ۱۰۰۰ فوت، حداکثر طول شکاف در مدل ضمنی ۳۰۰ فوت، توزیع مقادیر بازشدگی دهانه‌ی شکستگی‌ها به صورت لگاریتمی نرمال (شکل-۸) و میانگین شیب و جهت هر دسته از شکستگی‌ها بر اساس دسته‌بندی انجام شده در بخش دوم این مقاله و همچنین نحوه‌ی محاسبه‌ی نفوذپذیری شکاف با استفاده از قانون مربع ۱۲، به نرم‌افزار معرفی گردید. لازم به ذکر است به دلیل در دست

#### پانویس‌ها

1. Axial Fractures
2. Fracture Intensity
3. Artificial Neural Network
4. Fracture Drivers
5. correlation analysis
6. Discrete Fracture Network (DFN)

7. Explicit
8. Implicit Fracture Model (IFM)
9. Maximum Implicit Fracture Length
10. Deterministic
11. Stochastic
12. Cubic<sup>law</sup>

#### منابع

Reservoir Characterization of Pazanan Field, ۲۰۱۲  
[3]. Production research division, Mobil Oil Company, Fractured reservoirs of the Asmari Type, P۱۹۶۲, ۶۰۶-

[۱] مطالعه‌ی زمین‌شناسی سازند آسماری، گلریز و مرعشی، گزارش شماره‌ی-۳۷۹۷، ۱۹۸۳  
[2]. Petroleum Engineering and Geology Department, NISOC,