



مقاله پژوهشی

مدلسازی عددی تأثیر خزش سازند نمکی بر رفتار مکانیکی لوله جداری در یکی از میادین جنوب ایران

عبدالمجید رحیمی^{۱*}؛ محمدکاظم امیری^{۲*}؛ امیر خسروی فرد^۳؛ شهرام قاسمی^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز

۲- استاد، بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز

۴- استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2026.583616.1263

واژگان کلیدی	چکیده
خزش نمک، مچالگی لوله جداری، مدل یک بعدی مکانیکی زمین، مدل سازی عددی، سازند فارس پایینی	حفظ یکپارچگی ساختاری چاه در طول عمر میدان، یکی از پیش نیازهای اساسی برای تولید پایدار نفت و گاز محسوب می شود. در این میان، مچالگی لوله جداری در سازندهای دارای رفتار خزشی به ویژه لایه های نمکی به عنوان یکی از چالش های اصلی شناخته می شود. در این پژوهش، تأثیر خزش سازند نمکی بر رفتار مکانیکی لوله جداری در سازند فارس پایینی در یکی از میادین خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. به منظور شبیه سازی واقع گرایانه شرایط ژئومکانیکی، ابتدا یک مدل یک بعدی مکانیکی زمین بر اساس داده های واقعی یک چاه در یکی از میادین خلیج فارس توسعه یافت و خروجی های آن به عنوان ورودی اصلی در مدل سازی عددی سه بعدی در نرم افزار انسیس مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که خزش نمک در طول زمان منجر به افزایش تدریجی تنش های محیطی، کاهش فضای میان لوله جداری و سازند و رشد تغییر شکل تجمعی لوله جداری می شود، که در نهایت پایداری ساختاری چاه را تهدید می کند. همچنین، با استفاده از کانتورهای تنش و تغییر شکل، ناحیه های بحرانی لوله جداری به ویژه در تماس با لایه های نمکی به طور دقیق شناسایی شدند. یافته های این پژوهش می تواند به عنوان ابزاری کارآمد در پیش بینی ریسک مچالگی، طراحی بهینه لوله جداری و اجرای اقدامات پیشگیرانه در چاه های نفتی، که از سازندهای نمکی عبور می کنند، مورد استفاده قرار گیرد.

۱. پیش گفتار

چالش به دلیل عمق زیاد چاه ها و فعالیت شدید سازندهای نمکی فارس پایینی، اهمیت ویژه ای یافته است. آسیب های ناشی از خزش نمک به خوبی در میادین جهانی مستند شده اند. به عنوان مثال، در میدان های گازی سیچوان چین، خزش نمک سبب آسیب ساختاری در چندین چاه شده است [۳]. در ایران نیز، گزارش ها حاکی از آن است که در میدان نفتی مارون، از ۲۶۷ چاه تا سال ۲۰۰۵، حدود ۴۸ چاه دچار

مچالگی لوله جداری در چاه های نفت و گاز یکی از چالش های بزرگ در عملیات های حفاری و تولید، به ویژه در سازندهای نمکی، محسوب می شود. این پدیده عمدتاً ناشی از رفتار خزشی لایه های نمکی است که تحت تنش های بلندمدت، تغییر شکل پیوسته ای ایجاد کرده و فشار جانبی را به طور فزاینده ای بر لوله جداری وارد می کند [۲، ۱]. در میادین نفتی خلیج فارس، این

مچالگی شده‌اند که عمدتاً به دلیل تنش‌های بالا در لایه‌های نمکی گچساران بوده است [۴]. به‌طور مشابه، در میدان اسفند (خلیج فارس)، پنج چاه در سال ۱۳۹۱ به دلیل فشارهای غیرعادی ناشی از خزش نمک دچار ناپایداری شدند [۵].

مطالعات متعددی به بررسی مکانیزم‌های مچالگی لوله جداری پرداخته‌اند. ویکن و همکاران در سال ۱۹۹۴ پنج مکانیزم اصلی آسیب لوله جداری را شناسایی کردند که از جمله آن‌ها، فشار محوری و جانبی ناشی از خزش است [۱]. ویفنگ در سال ۲۰۱۱ فشار خارجی ناشی از خزش نمک-گچ را در چاه‌های افقی با مدل تفاضل محدود بررسی کرد و نشان داد که حفاری در امتداد حداقل تنش افقی ایمن‌ترین گزینه است [۲]. کالدال و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز بیان کردند که بیضی‌شدگی جزئی، مقاومت مچالگی لوله جداری را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۶]. در حوزه مدل‌سازی عددی، روش‌های مختلفی ارائه شده است. شتن و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک مدل عددی برای سیستم کامل چاه (شامل سیال، لوله جداری، سیمان و سازند) ایجاد کردند [۷]. وانگ و ساموئل در سال ۲۰۱۶ یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی ارائه دادند که پارامترهای لوله جداری را تحت شرایط مختلف پیش‌بینی می‌کند [۸]. گئو در سال ۲۰۱۸ تأثیر لغزش گسل بر تغییر شکل لوله جداری را با مدل المان محدود ارزیابی کرد و نشان داد که ترکیب لغزش گسل با تنش‌های خارجی، خطر تغییر شکل را افزایش می‌دهد [۹]. حسناوی در سال ۲۰۲۴ نیز در مطالعه‌ای در خلیج فارس، نشان داد که طراحی پوشش جدید و تغییر گرید لوله جداری، عملکرد و طول عمر آن را بهبود می‌بخشد [۱۰].

با این وجود، بیشتر این مطالعات خزش را به‌صورت ایستا یا با مدل‌های ساده‌شده در نظر گرفته‌اند و کمتر به رفتار وابسته به زمان خزش در سازند فارس پایینی و تأثیر آن بر توزیع دینامیک تنش در لوله جداری پرداخته‌اند. همچنین، بسیاری از مدل‌ها از داده‌های واقعی چاه برای کالیبراسیون استفاده نکرده‌اند [۱۱-۱۳]. مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که آسیب لوله جداری در میادین بالغ در حال افزایش است [۱۴] و لزوم توسعه سیستم‌های یکپارچه برای پیش‌بینی آن ضروری است [۱۵]. در این پژوهش، با هدف پرداختن به این شکاف، یک چارچوب مدل‌سازی دو مرحله‌ای ارائه شده است. ابتدا یک مدل

ژئومکانیکی یک‌بعدی بر اساس داده‌های واقعی یک چاه در خلیج فارس توسعه یافت و سپس خروجی‌های آن در یک مدل عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار انسیس برای شبیه‌سازی تأثیر خالص خزش نمک بر مچالگی لوله جداری مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد امکان شناسایی دقیق نواحی بحرانی و پیش‌بینی رفتار بلندمدت لوله جداری بدون وارد کردن پیچیدگی‌های خوردگی را فراهم می‌آورد.

۲. روش انجام کار

برای توسعه یک مدل عددی سه‌بعدی قابل اعتماد در نرم‌افزار ANSYS، نیاز به ورودی‌های ژئومکانیکی دقیقی است که شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوره^۱، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، فشار منفذی و تنش‌های برجا می‌شود. با این حال، اندازه‌گیری مستقیم این پارامترها از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی یا چاه‌پیمایی، اغلب از نظر هزینه و پیچیدگی عملیاتی چالش‌برانگیز است. برای غلبه بر این محدودیت، یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی جهت تخمین خواص پتروفیزیکی و ژئومکانیکی ساخته شد که به‌عنوان ورودی اصلی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی در ANSYS مورد استفاده قرار گرفت.

۱.۲. ساخت مدل یک‌بعدی مکانیکی زمین

در این پژوهش، داده‌های مورد نیاز از منابع متنوعی شامل نگاره‌های پتروفیزیکی، اطلاعات حفاری، گزارش‌های مهندسی چاه، روابط تجربی معتبر و نتایج آزمایش‌های میدانی جمع‌آوری شدند. این داده‌ها به‌منظور توسعه مدل یک‌بعدی مکانیکی زمین مورد استفاده قرار گرفتند.

با استفاده از لاگ‌های زمان عبور موج فشاری^۲، زمان عبور موج برشی^۳ و چگالی^۴، پارامترهای مکانیکی سازند از جمله سرعت موج فشاری، سرعت موج برشی، ضریب پواسون و مدول یانگ استاتیک مطابق با معادلات (۱) تا (۴) محاسبه گردیدند.

^۱ UCS

^۲ DTC

^۳ DTS

سازند که پارامترهای کلیدی در توصیف مقاومت برشی سازند محسوب می‌شوند با استفاده از معادلات (۷)، (۸) و (۹) مبتنی بر همان مطالعه تخمین زده شدند [۱۶].

$$PHI = 6.1395(V_p/1000)^{1.0088} \quad (۷)$$

$$C = \frac{UCS}{2 \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (۸)$$

$$T_1 = 0.1191(UCS)^{1.0088} \quad (۹)$$

فشار منفذی با استفاده از روش اصلاح‌شده ایتون تخمین زده شد و نتایج آن با داده‌های تست تکرار سازنده اعتبارسنجی شد. همچنین، تنش‌های برجا با بهره‌گیری از تئوری پوروالاستیسیته محاسبه و با داده‌های تست نشت اعتبارسنجی گردید. در شکل ۱، مدل یک‌بعدی مکانیکی زمین توسعه‌یافته در این پژوهش ارائه شده است.

$$V_p = DT_c^{-1} \quad (۱)$$

$$V_s = DT_s^{-1} \quad (۲)$$

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۳)$$

$$Pr = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (۴)$$

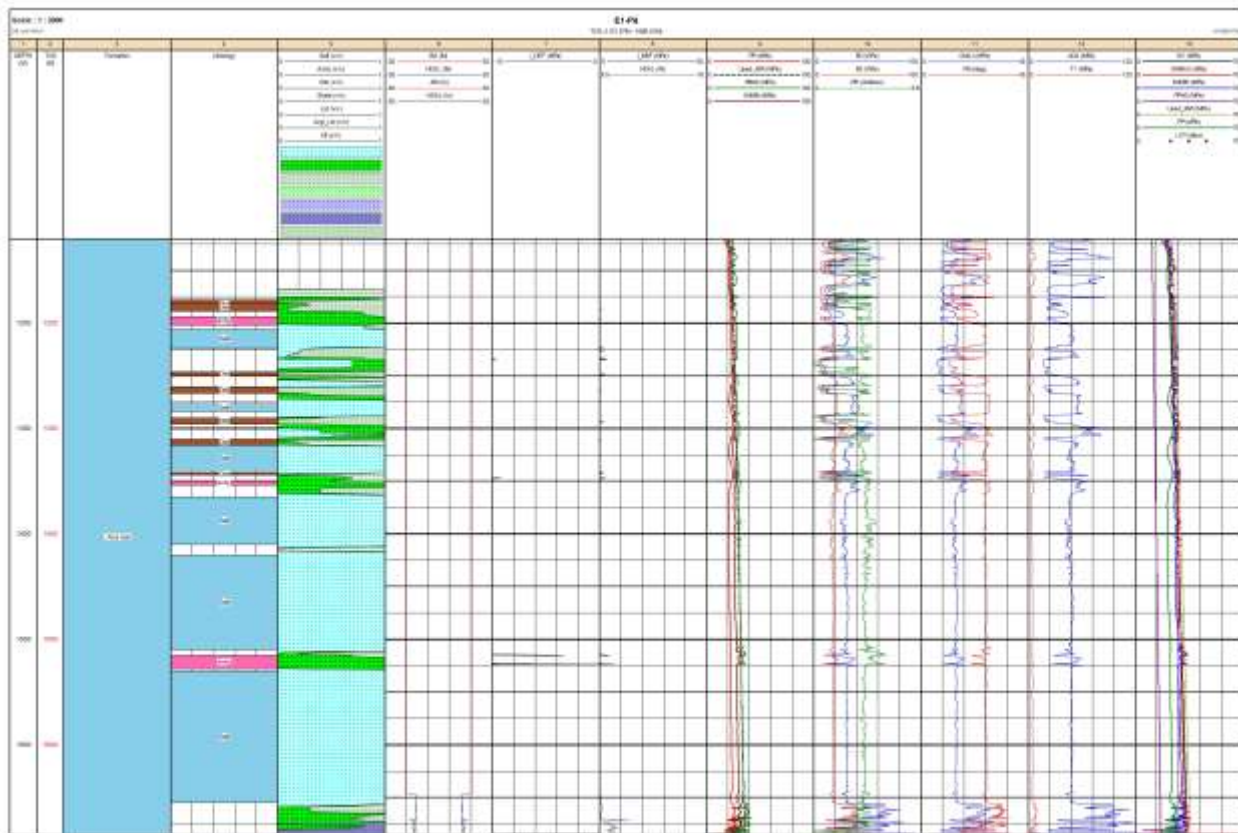
که در آن DTC زمان عبور موج فشاری، DTS زمان عبور موج برشی، V_p سرعت موج فشاری، V_s سرعت موج برشی، Pr نسبت پواسون و ρ چگالی است.

برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ استاتیک از روابط تجربی امیری و همکاران (۲۰۱۹) استفاده شد [۱۶].

$$E_s = 0.5795 * E_d + 0.2449 \quad (۵)$$

$$UCS = 2.2915 * E_s + 6.8467 \quad (۶)$$

همچنین، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کششی



شکل ۱. مدل زمین مکانیکی یک بعدی چاه

⁶ Leak-off Test

⁵ Repeat Formation Tester

مدلسازی عددی تأثیر خزش سازند نمکی بر رفتار مکانیکی لوله
جداری در یکی از میادین جنوب ایران

نشریه ژئومکانیک و ژئوانرژی؛ دوره ۸؛ شماره ۳؛ پاییز ۱۴۰۴

جدول ۱. مقادیر مورد استفاده در مدلسازی عددی

برای لایه نمکی

Lithology	Salt	Salt	Salt	Salt
Data Type	Std. ev.	min	Max	mean
E (Gpa)	1.2038	4.85	21.6	17.93
ν	0.015	0.11	0.35	0.28508
UCS (MPa)	2.759	17.95	56.38	47.935
c (MPa)	0.696	7.16	16.9	14.648
ϕ (deg)	0.914	12.8	29.4	27.094
$T1$ (MPa)	0.2427	1.78	5.2	4.4665
ρ (g/cc)	0.039	2.013	2.49	2.0836

جدول ۲. مقادیر مورد استفاده در مدلسازی عددی

برای مشخصات سیمان [۱۸]

Lithology Data Type	Average
E (Gpa)	22.37
ν	0.30
UCS (MPa)	41.00
c (MPa)	16.8
ϕ (deg)	4.38
$T1$ (MPa)	4.38
ρ (kg/m3)	2343.33

جدول ۳، مقادیر تنش‌های برجا، فشار گل و فشار منفذی را در اعماق مختلف چاه نشان می‌دهد. این داده‌ها بر اساس خروجی‌های مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی استخراج شده‌اند و نقشی کلیدی در درک رفتار مکانیکی سازند و ارزیابی پایداری چاه ایفا می‌کنند.

تنش‌های برجا نشان‌دهنده بارهای وارده بر ساختار زمین در عمق‌های مختلف هستند، در حالی که فشار گل و فشار منفذی به‌عنوان پارامترهای کنترل‌کننده تعادل فشاری در دیواره چاه عمل می‌کنند و از رخداد پدیده‌های نامطلوبی مانند شکست سازند یا ناپایداری چاه جلوگیری می‌کنند.

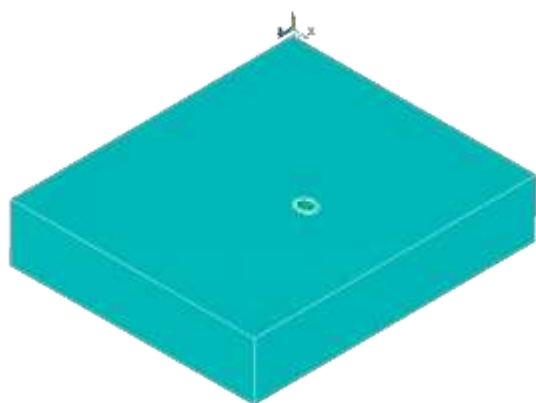
بررسی توزیع این پارامترها در طول عمق، امکان شناسایی مناطق بحرانی و بهینه‌سازی طراحی سیستم حفاری و ساختار لوله جداری را فراهم می‌آورد. همچنین، این اطلاعات به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های عددی دقیق‌تر از رفتار سیستم چاه در برابر خزش سازند نمکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پژوهش، داده‌های مربوط به عمق ۱۱۲۰ متری که متناظر با سازند نمکی است برای توسعه مدل عددی انتخاب شده‌اند. این عمق به‌دلیل شدت بالای خزش و حساسیت مکانیکی، به‌عنوان عمق مرجع در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

این مدل، که در شکل ۱ نمایش داده شده است، با ارائه توزیع عمقی پارامترهای کلیدی ژئومکانیکی از جمله تنش عمودی، تنش افقی ماکزیمم، تنش افقی مینیمم، فشار منفذی، مدول‌های الاستیسیته، مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب پواسون و زاویه اصطکاک داخلی بستری دقیق و قابل اعتماد برای انجام تحلیل‌های عددی پیشرفته در نرم‌افزار ANSYS فراهم می‌آورد. در واقع، نتایج این مدل به‌عنوان شرایط مرزی و خواص مکانیکی سازند در شبیه‌سازی سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت تا تأثیر خزش سازندهای نمکی بر رفتار لوله جداری در طول زمان به‌صورت واقع‌گرایانه مورد بررسی قرار گیرد. یافته‌های مدل با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در چاه مقایسه و تأیید شدند. برای یکپارچه‌سازی نتایج مدل یک‌بعدی در مدل عددی و اختصاص دقیق پارامترهای مکانیکی به هر واحد لیتولوژی، از آنالیز خرده‌سنگ‌های حفاری استفاده شد. به‌طور خاص، در اعماقی که خرده‌سنگ‌ها به‌صورت صددرصد یکسان و متعلق به یک نوع لیتولوژی (به‌ویژه سازند نمکی) گزارش شده بودند، میانگین‌گیری آماری روی پارامترهای ژئومکانیکی انجام گرفت تا ویژگی‌های نماینده هر لیتولوژی استخراج شود. مقادیر نهایی در جداول بعدی ارائه شده‌اند.

در جداول ۱ و ۲، پارامترهای اصلی و شرایط ورودی مورد استفاده در مدلسازی عددی ارائه شده‌اند. این مقادیر بر اساس نتایج مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی استخراج شده و نقش کلیدی در تحلیل رفتار مکانیکی سازند نمکی ایفا می‌کنند. جدول ۱ شامل خواص مکانیکی لوله جداری و جدول ۲ خواص لایه سیمان است. این پارامترها به‌صورت هم‌زمان و جداگانه در مدل عددی در نظر گرفته شده‌اند تا شرایط واقعی چاه با دقت بیشتری شبیه‌سازی شود.

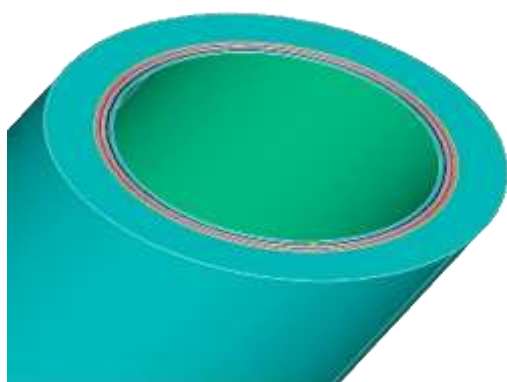
در نظر گرفتن خواص فیزیکی و مکانیکی هر دو مؤلفه، امکان تحلیل تعامل مکانیکی بین لوله جداری و سیمان را فراهم می‌کند و به درک بهتر پاسخ سیستم چاه در برابر بارگذاری زمان ناشی از خزش نمک کمک می‌کند. این رویکرد جامع، پایه‌ای محکم برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار ANSYS فراهم می‌آورد.



شکل ۲. هندسه ساخته شده برای مدل در نرم افزار

Ansys

همان گونه که در شکل ۳ آمده است، ساختار چاه از شش استوانه متحدالمرکز تشکیل شده است. بیرونی ترین استوانه، غلاف سیمانی را نشان می دهد و پنج استوانه داخلی، لوله جداری را مدل می کنند که فولاد N80 هست. ابعاد دقیق لایه های سیمان و لوله جداری در جدول ۴ ارائه شده اند و انحراف آن هم ۳۵ درجه هست.



شکل ۳. طراحی هندسه لایه سیمانی و لوله جداری

جدول ۴. ابعاد لوله جداری و سیمان

قطر خارجی	قطر داخلی	
0.156	0.122	سیمان
0.122	0.1196	لوله جداری
0.1196	0.1172	
0.1172	0.1148	
0.1148	0.1124	
0.1124	0.11	

جدول ۳. ارقام مورد استفاده برای تنش در مدلسازی

عددی برای عمق های مختلف

Layers	1
TVD (m)	1120
<i>SV</i> (MPa)	21.5
<i>SH</i> (MPa)	20.1
<i>Sh</i> (MPa)	18.8
<i>Pp</i> (MPa)	16.6
<i>Pm</i> (MPa)	23.9

برای اعتبارسنجی مدل یک بعدی مکانیکی زمین، ابتدا مقادیر تنش های درجا با استفاده از نتایج آزمایش LOT و XLOT اعتبارسنجی شدند. علاوه بر این، جهت گیری های تنش درجا با استفاده از یک نگاره قطرسنجی ۴ بازویی اعتبارسنجی شدند. از میزان هدر رفت گل حفاری و یا اضافه حجم گل برای نیز برای اعتبارسنجی مدل یک بعدی مکانیکی زمین کمک گرفته شد [۱۸].

۲.۲. ساخت مدل در ANSYS

مدل عددی سه بعدی در نرم افزار ANSYS در چهار مرحله اصلی توسعه یافت که به ترتیب ساخت هندسه، اختصاص المان ها، تولید شبکه^۷ و خواص مکانیکی و اعمال شرایط بارگذاری مشتق شده از مدل ژئومکانیکی یک بعدی را شامل می شود.

دامنه زمین شناسی میدان مورد مطالعه دارای ابعاد ۴۳۲ × ۵۷۷ × ۲۵ متر هست. با این حال، به دلیل هزینه محاسباتی بالا ناشی از شبکه بندی دقیق چنین حجم بزرگی، یک مدل با مقیاس کاهش یافته طراحی شد تا تمرکز تحلیل بر بازه حاوی لایه نمکی باشد.

همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، ابعاد مدل نهایی به ۵ × ۱ × ۴ متر کاهش یافت و در عمق ۱۱۲۰ متر قرار دارد. این اندازه ضمن حفظ دقت کافی در تحلیل تنش و خزش، راندمان محاسباتی را به طور چشمگیری بهبود می بخشد.

⁷ Mesh

در این مطالعه، دو نوع المان SOLID186 و SHELL281 در نرم افزار ANSYS برای مدل سازی دقیق پاسخ مکانیکی سیستم چاه انتخاب شدند.

المان SOLID186 یک المان حجمی سه بعدی مرتبه بالا با ۲۰ گره است که قادر به شبیه سازی رفتارهای پیچیده تنش- کرنش تغییر شکل با دقت عددی بالا می باشد. این المان از مدل سازی پدیده های وابسته به زمان، از جمله خزش، پشتیبانی می کند و عملکرد عالی در همگرایی شبکه و تشخیص گرادین های تنش نشان می دهد. این ویژگی ها آن را به گزینه ای ایده آل برای مدل سازی سازند نمکی و لایه های سنگی اطراف تبدیل می کند.

المان SHELL281 یک المان پوسته ای چهار گره ای است که برای سازه هایی طراحی شده که در آن ها ابعاد درون صفحه به مراتب بزرگ تر از ضخامت هستند مانند لوله جداری و غلاف سیمانی در سیستم های چاه. این المان ضمن کاهش هزینه محاسباتی، دقت کافی برای مدل سازی اجزای دیواره ای نازک را فراهم می آورد و به خوبی تغییر شکل های خمشی، غشایی و برشی عرضی را در هندسه های استوانه ای لایه ای ثبت می کند. پس از انتخاب المان ها، خواص مکانیکی مواد شامل نمک، سیمان و فولاد لوله جداری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی استخراج شده از مدل یک بعدی محاسبه شده در نرم افزار IP^۸، تعریف شدند. تمامی مقادیر به عنوان ورودی های ماده ایزوتروپیک یا الاستوپلاستیک متناسب با رفتار مکانیکی مورد انتظار هر جزء در شرایط محیط چاه در مدل عددی اعمال شدند.

رفتار سنگ نمک در این پژوهش با استفاده از یک مدل خزشی وابسته به زمان شبیه سازی شده است. سنگ نمک به دلیل ماهیت ویسکوپلاستیک خود، حتی تحت تنش های ثابت نیز در طول زمان دچار تغییر شکل تدریجی می شود. از این رو، استفاده از یک مدل الاستیک صرف قادر به باز نمایی رفتار واقعی این سازند نیست. در این مطالعه، نرخ کرنش خزشی به عنوان مدل رفتاری وابسته به زمان در نرم افزار ANSYS به کار گرفته شد تا تغییر شکل تدریجی سنگ در اثر بارگذاری طولانی مدت شبیه سازی شود. این مدل با محاسبه نرخ تجمع کرنش خزشی در هر گام زمانی، امکان بررسی انتقال تدریجی

بار از سنگ به لوله جداری و تغییرات تنش در طول زمان را فراهم می کند. در این پژوهش، رفتار خزشی سنگ نمک بر اساس مدل خزش گاروفالو^۹ مدل سازی شده است. در این مدل، نرخ کرنش خزشی تابعی از تنش مؤثر بوده و به صورت یک رابطه توانی بیان می شود که در معادله ۱۰ بیان شده است. بنابراین با افزایش تنش، نرخ خزش نیز افزایش یافته و تغییر شکل وابسته به زمان سنگ نمک به خوبی باز نمایی می شود. این مدل به دلیل سادگی، پایداری عددی و تطابق مناسب با رفتار خزشی سنگ نمک، در بسیاری از مطالعات ژئومکانیکی و تحلیل های اجزای محدود مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C1[\sinh(C2\sigma)]^{C3}e^{C4/T} \quad (10)$$

که در آن $\dot{\epsilon}_{cr}$ نرخ کرنش و T زمان بر حسب درجه کلوین می باشد. C1، C2 و C3 پارامترهای خزش است که از نتایج تست خزش بروی نمونه نمک که توسط طاهری و همکاران (۲۰۲۰) بدست آورده شد [۱۷]. گرچه این مدل در ابتدا برای کاربردهای دمای بالا توسعه یافته است، اما در شرایط دمای نسبتاً ثابت در اعماق چاه (حدود ۳۳۸ کلوین در میدان مورد مطالعه)، توانسته است رفتار تغییر شکل تدریجی و وابسته به زمان سازندهای نمکی تحت بارگذاری ژئومکانیکی پایدار را به خوبی شبیه سازی کند.

پارامترهای مدل گاروفالو بر اساس داده های آزمایشگاهی روی نمک هالیت کالیبره شده اند و در جدول ۵ ارائه شده اند [۱۷].

جدول ۵. مقادیر ضرایب خزش گاروفالو برای

سازند [۱۷]

Creep	T1
C1	2.5E-26
C2	3
C3	2718

این مدل، نقش کلیدی در پیش بینی پاسخ ساختاری بلند مدت و عمر مفید سیستم لوله جداری-سیمان تحت بارهای ژئومکانیکی مداوم ایفا می کند. علاوه بر این، معیار شکست موهر-کولمب به صورت کد در محیط ANSYS پیاده سازی گردید تا پاسخ شکست برشی مواد سازندی کنترل

^۹ Garofalo Creep Model

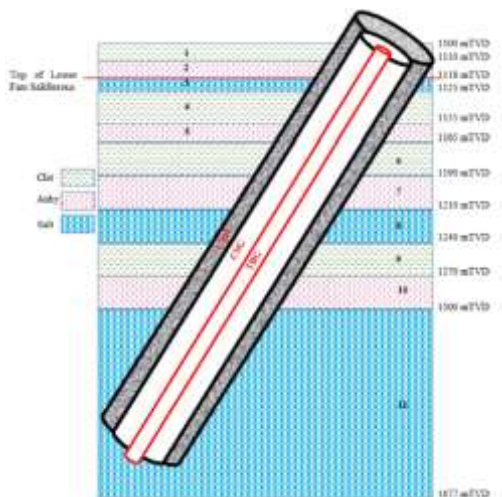
^۸ Interactive Petrophysics

پس از تولید شبکه و آماده‌سازی مدل، شرایط مرزی مناسب و سناریوهای بارگذاری متناظر با شرایط واقعی درون چاهی، برای شبیه‌سازی دقیق پاسخ مکانیکی سیستم چاه اعمال شدند. انتخاب بارهای واقع‌گرایانه شامل تنش‌های برجا، فشار گل، فشار منفذی و اثرات حرارتی برای اطمینان از دقت و قابلیت اطمینان نتایج عددی ضروری است. این پارامترها بر اساس خروجی‌های مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی استخراج شدند.

در این مطالعه، تنش عمودی برابر با $21/5$ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. همچنین، تنش افقی ماکزیمم و تنش افقی مینیمم هر دو مقدار 19 مگاپاسکال اختیار کردند که نشان‌دهنده یک رژیم تنش تقریباً ایزوتروپیک افقی در عمق هدف 1120 متر است.

فشار داخلی اعمال‌شده بر سطح داخلی لوله جداری برابر با $13/2$ مگاپاسکال در نظر گرفته شد که نماینده فشار سیال چاه تحت شرایط عملیاتی است.

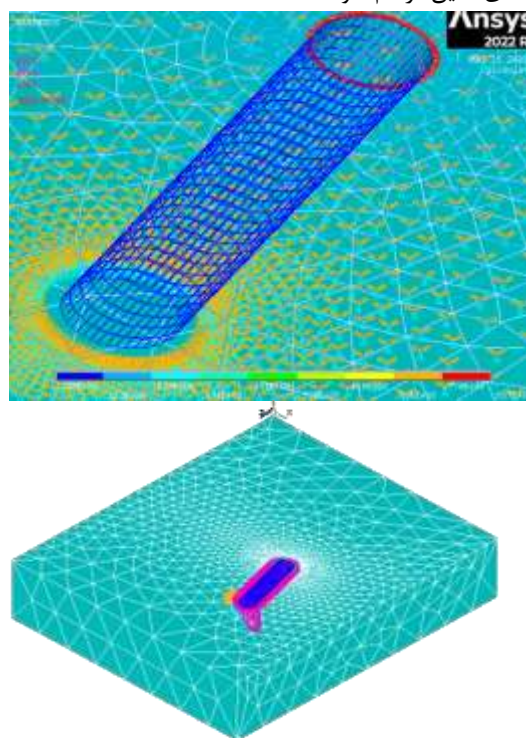
غلاف سیمانی نیز تحت یک فشار محصورکننده جانبی معادل $25/75$ مگاپاسکال قرار گرفت که با بار سازند اطراف در تعادل ژئومکانیکی است. علاوه بر این، دمای محیط در سراسر دامنه به‌صورت یکنواخت برابر با 338 کلوین در نظر گرفته شد تا شرایط حرارتی واقعی در عمق چاه شبیه‌سازی شود. همچنین، شتاب گرانشی $9/81$ متر بر مجذور ثانیه به مدل اعمال گردید تا اثر نیروهای حجمی در تحلیل ژئومکانیکی به‌درستی لحاظ شود.



شکل ۵. ستون چینه سازند

شود. این معیار که همزمان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را در نظر می‌گیرد، برای مدل‌سازی تسلیم پلاستیکی و گسیختگی سازندهای ژئومکانیکی تحت شرایط تنش پیچیده بسیار مناسب است.

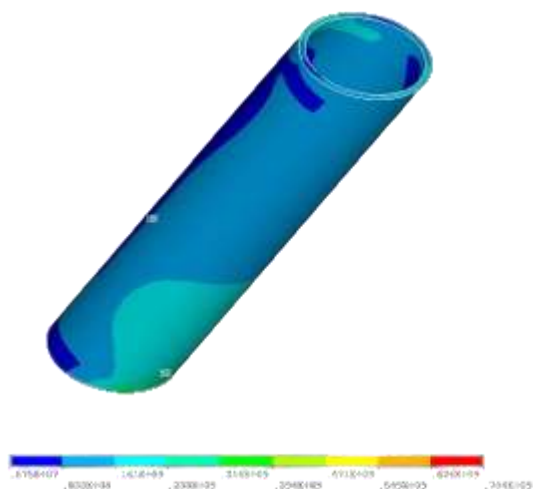
در گام بعدی، یک شبکه حجمی برای دامنه سازند با استفاده از المان‌های چهاروجهی^{۱۰} ایجاد شد. لبه‌های عمودی دامنه به‌طور گرادینانی به 10 بخش تقسیم گردیدند، به‌گونه‌ای که تراکم شبکه با نزدیک‌شدن به چاه افزایش یابد و در نتیجه، مش‌های ریزتری در نواحی بحرانی اطراف چاه تولید شوند. با توجه به هندسه استوانه‌ای لوله جداری و غلاف سیمانی، از یک رویکرد شبکه‌بندی ساختاریافته استفاده شد. بدین‌منظور، لبه‌های محیطی هر لایه متحدالمرکز به 50 بخش و کمان‌های شعاعی که بخش‌های نیم‌دایره‌ای سیمان و لوله جداری را نشان می‌دهند به 40 بخش تقسیم شدند. در نهایت، همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، فرآیند شبکه‌بندی با به‌کارگیری المان‌های هشت‌وجهی و روش sweep تکمیل گردید تا ساختاری مناسب برای تحلیل‌های عددی دقیق فراهم شود.



شکل ۴. شبکه‌بندی سازند، سیمان و لوله جداری

¹⁰ Tetrahedral

تنش در سازند اطراف است. گسترش منطقه تمرکز تنش که در کانتورهای سال‌های بعدی به صورت رنگ‌های قرمز گسترده‌تر ظاهر می‌شود هشدار می‌دهد از تخریب احتمالی مکانیکی در طولانی‌مدت فراهم می‌کند، حتی در غیاب هرگونه خوردگی یا عوامل شیمیایی. این یافته، اهمیت در نظر گرفتن رفتار خزشی سازندهای نمکی را در طراحی بلندمدت سیستم‌های لوله جداری برجسته می‌سازد.



شکل ۶. کانتور تغییر تنش فون مایز لوله جداری
در سال اول

در شکل ۷، کانتور تنش فون مایز مربوط به سال پنجم تحلیل ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، تمرکز تنش قابل توجهی در ناحیه پایینی لوله جداری شکل گرفته و مناطقی با رنگ قرمز محدود نشان‌دهنده افزایش تنش مؤثر در این ناحیه ظاهر شده‌اند. این الگو بیانگر شروع تجمع تنش در اثر رفتار خزشی پیوسته سازند نمکی است. با گذشت زمان، سازند اطراف تحت فشار بارگذاری ژئومکانیکی، به تدریج دچار جابه‌جایی و تغییر شکل شده و این تغییر شکل زمان‌بسته، فشار وارده بر دیواره لوله جداری را افزایش می‌دهد. در نتیجه، حتی در غیاب هرگونه خوردگی یا عامل شیمیایی، سیستم لوله جداری تحت تهدید تدریجی قرار می‌گیرد. این یافته، تأکید می‌کند که خزش سازند نمکی به‌ویژه در اعماقی که با نمک خالص مواجه است به‌تنهایی می‌تواند منجر به مچالگی بلندمدت ساختار چاه شود.

در این پژوهش عمق ۱۱۲۰ متر که مربوط به لایه نمک هست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تمامی اطلاعاتی که وارد نرم‌افزار انسیس می‌شود مربوط به این لایه می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

از آنجا که لوله جداری از جنس فولاد بوده و رفتار آن در محدوده کاری مورد بررسی شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود، تنش فون مایز به عنوان یکی از معتبرترین معیارهای ارزیابی تسلیم مواد شکل‌پذیر انتخاب شد. این معیار با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان مؤلفه‌های مختلف تنش، یک تنش معادل ارائه می‌کند که امکان ارزیابی احتمال آغاز تسلیم ماده را فراهم می‌سازد. هرگاه مقدار تنش فون مایز از تنش تسلیم فولاد مورد استفاده در لوله جداری فراتر رود، آغاز تغییر شکل پلاستیک و احتمال آسیب مکانیکی پیش‌بینی می‌شود، بنابراین این معیار شاخص مناسبی برای ارزیابی ایمنی سازه در شرایط بارگذاری پیچیده است.

۱.۳. تنش فون مایز

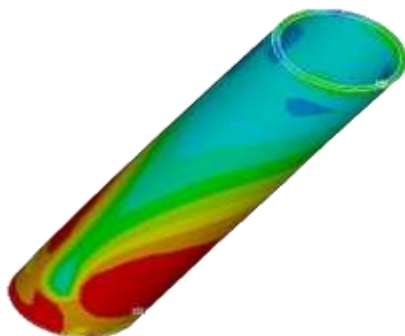
تأثیرات تنش فون مایز^{۱۱} در لوله جداری را به صورت کانتور و نمودار و همچنین تأثیرات تغییر شکل^{۱۲} را به صورت کانتور و نمودار و تأثیرات کرنش خزش بر سازند را به صورت کانتور و نمودار در سال‌های اول، پنجم، دهم و چهاردهم بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در ابتدای تحلیل (سال اول)، بیشترین تمرکز تنش فون مایز در ناحیه پایینی لوله جداری نزدیک به کف چاه رخ می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در این مرحله هیچ ناحیه‌ای با تنش بحرانی (رنگ قرمز شدید) دیده نمی‌شود، که نشان‌دهنده پایداری نسبی ساختار لوله جداری در شرایط اولیه است.

با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند خزش سازند نمکی، نواحی با تنش بالا به تدریج گسترش یافته و از پایین به سمت بالای لوله جداری حرکت می‌کنند. این روند بیانگر افزایش تدریجی بار مؤثر وارده بر دیواره لوله جداری در اثر تغییرات زمان‌بسته

¹² Deformation

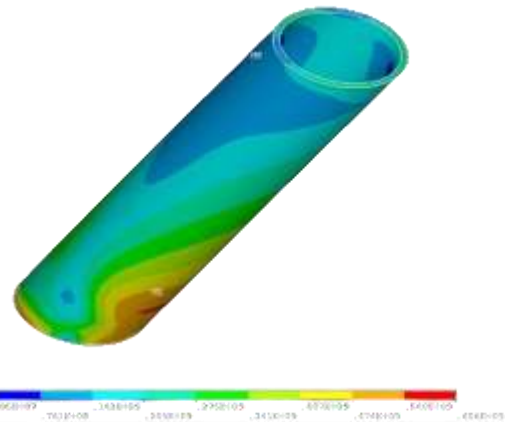
¹¹ Von mises stress

ارتفاع لوله جداری گسترش یافته‌اند. این رفتار نشان می‌دهد که تمرکز تنش به‌صورت پیشرونده در طول دیواره لوله جداری جابه‌جا شده است نتیجه تغییر شکل تدریجی سازند اطراف تحت فشار بارگذاری ژئومکانیکی قرار گرفته است. با این حال، شیب تغییرات تنش در سال‌های انتهایی (بین سال دهم تا چهاردهم) نسبت به دوره‌های اولیه ملایم‌تر است. این ملاحظه نشان می‌دهد که سیستم لوله جداری-سیمان-سازند در حال نزدیک شدن به یک حالت تعادل نسبی بین نرخ خزش سازند و مقاومت مکانیکی ساختار است. با وجود این تعادل نسبی، حضور مداوم تنش‌های بالا به‌ویژه در نواحی میانی و تحتانی لوله جداری همچنان خطر آغاز مچالگی^{۱۳} را در افق زمانی طولانی‌تر فراهم می‌کند. این یافته به‌وضوح تأکید می‌کند که حتی در غیاب عوامل شیمیایی یا خوردگی، خزش سازند نمکی به‌تنهایی می‌تواند چالشی جدی برای یکپارچگی ساختاری چاه محسوب شود.

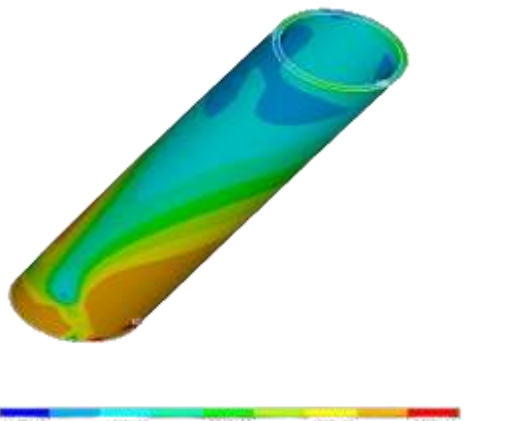


شکل ۹. کانتور تنش فون مایز لوله جداری در سال چهاردهم

برای بررسی تأثیر خزش سازند نمکی بر رفتار بلندمدت لوله جداری، تغییرات تنش فون مایز در چهار نقطه (۴۱۶۳، ۶۱۱۳، ۶۵۸۱، ۶۶۴۳) در طول ۱۴ سال شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نقاط مورد بررسی در ناحیه بحرانی سطح



شکل ۷. کانتور تنش فون مایز لوله جداری در سال پنجم

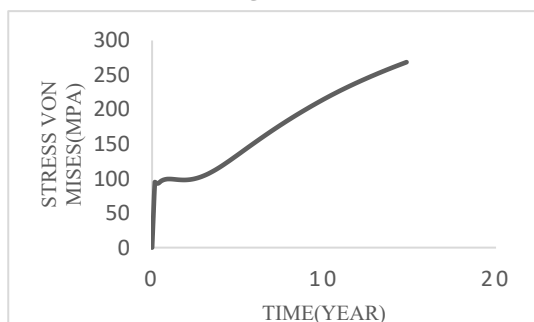


شکل ۸. کانتور تنش فون مایز لوله جداری در سال دهم

کانتور تنش فون مایز در شکل ۸ سال دهم نشان می‌دهد که نواحی با تمرکز بالای تنش به تدریج گسترش یافته و توزیع رنگ‌های قرمز در طول لوله جداری افزایش یافته است. این روند بیانگر تشدید تدریجی بار مؤثر ناشی از رفتار خزشی وابسته به زمان سازند نمکی است. در شکل ۹ سال چهاردهم، الگوی تنش کاملاً تکامل یافته است نواحی با حداکثر تنش (رنگ قرمز شدید) دیگر محدود به پایین چاه نبوده و به‌طور قابل توجهی در امتداد

¹³ buckling

سال ۱۴ رسیده است، با شیب اولیه ملایم و افزایش پیوسته در طول زمان بدون نشانه‌ای از اشباع یا تعادل نسبی، این الگو نشان‌دهنده تأخیر در انتقال بار به نواحی بالایی لوله جداری است، که ناشی از تغییر شکل تدریجی سازند و توزیع مجدد فشار در طول ارتفاع چاه می‌باشد. با این حال، مقدار نهایی تنش ۲۷۰ مگاپاسکال هنوز در محدوده ایمنی فولاد N-80 قرار دارد، اما نشان‌دهنده گسترش تدریجی تمرکز تنش به سمت بالا است که در افق زمانی طولانی‌تر، می‌تواند منجر به افزایش خطر تسلیم پلاستیکی در نواحی بالایی شود. این یافته، نقش خزش سازند نمکی به‌عنوان یک مکانیزم بلندمدت در تخریب ساختاری چاه تأیید می‌کند.

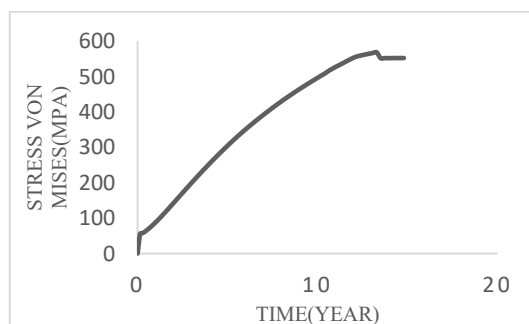


شکل ۱۱. نمودار تنش فون مایز در نقطه ۶۱۱۳

تحلیل زمانی تنش فون مایز برای شکل ۱۲ در نقطه ۶۵۸۱ نشان می‌دهد که این ناحیه با موقعیت میانی در لوله جداری تحت تأثیر خزش سازند نمکی قرار گرفته است؛ با روند افزایش تنشی که در ابتدا شدید و در ادامه ملایم است. تنش از حدود ۵۰ مگاپاسکال در آغاز به ۲۶۰ مگاپاسکال در سال آخر رسیده است، با شیب بالا در دو سال اول و کاهش تدریجی شیب در سال‌های بعد نشانه‌ای از انتقال بار از نواحی پایینی و تشکیل تعادل نسبی در این ناحیه. این الگو، تأخیر در انتقال بار نسبت به نقاط پایینی و پاسخ میانی سیستم به خزش سازند را نشان می‌دهد. با این حال، مقدار نهایی تنش ۲۶۰ مگاپاسکال هنوز در محدوده ایمنی فولاد N-80 قرار دارد، اما نشان‌دهنده تجمع تدریجی تنش در نواحی میانی است که در افق زمانی طولانی‌تر، می‌تواند منجر به افزایش خطر تسلیم پلاستیکی در این ناحیه شود.

داخلی لوله جداری قرار دارند، یعنی ناحیه‌ای که تحت تأثیر تغییر شکل‌های ناشی از خزش سنگ نمک، بیشترین تنش فون مایز ایجاد شده است. این ناحیه که در کانتورهای تنش با رنگ قرمز مشخص شده است، مستعد آغاز و توسعه مچالگی لوله جداری بوده و به همین دلیل به‌عنوان مبنای استخراج و تحلیل نتایج انتخاب شده است.

تحلیل زمانی تنش فون مایز در نقطه ۴۱۶۳ واقع در ناحیه پایینی لوله جداری نشان می‌دهد که تحت تأثیر خزش سازند نمکی، تنش به‌صورت غیرخطی و وابسته به زمان افزایش یافته است. از حدود ۶۰ مگاپاسکال در آغاز تا حداکثر ۵۶۰ مگاپاسکال در سال ۱۴، با شیب اولیه تند و کاهش تدریجی شیب در سال‌های بعدی مشاهده می‌شود. این الگو، تأخیر در انتقال بار و تغییر شکل تدریجی سازند را نشان می‌دهد که منجر به تجمع تنش در ناحیه حساس پایینی و در نهایت نزدیک شدن به تعادل دینامیکی بین خزش سازند و مقاومت لوله جداری می‌شود. با این حال، مقدار نهایی تنش ۵۶۰ مگاپاسکال نزدیک به حد تسلیم فولاد N-80 است و خطر تسلیم پلاستیکی یا آغاز مچالگی را حتی در غیاب هرگونه عامل خارجی مانند خوردگی در افق زمانی طولانی‌تر افزایش می‌دهد. این یافته، نقش خزش سازند نمکی به‌عنوان یک مکانیزم مستقل و خطرناک در تخریب ساختاری چاه را به‌وضوح تأیید می‌کند.

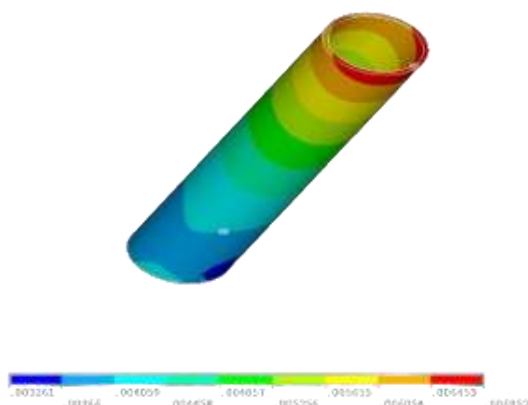


شکل ۱۰. نمودار تنش فون مایز در نقطه ۴۱۶۳

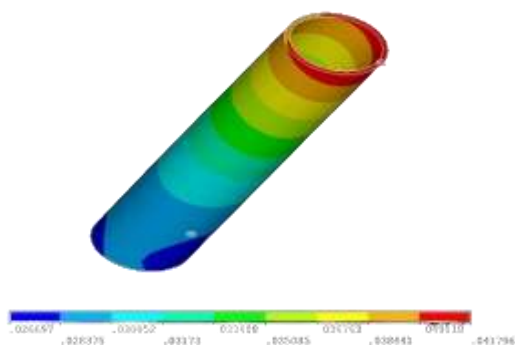
تحلیل زمانی تنش فون مایز در نقطه ۶۱۱۳ نشان می‌دهد که این ناحیه با وجود موقعیت بالاتر نسبت به نقاط پایینی تحت تأثیر خزش سازند نمکی قرار گرفته است؛ با این تفاوت که روند افزایش تنش کندتر و با تأخیر زمانی رخ داده است. تنش از حدود ۹۵ مگاپاسکال در آغاز به ۲۷۰ مگاپاسکال در

تغییر شکل را نشان می‌دهد. در سال اول، حداکثر جابه‌جایی به ۰/۶۸۵ سانتی‌متر می‌رسد و ناحیه بالایی لوله جداري حدود نصف محیط اولیه تحت تأثیر بیشترین جابه‌جایی قرار گرفته است. این الگو، آزادی حرکت بیشتر ناحیه بالایی را نشان می‌دهد که باعث می‌شود این بخش در مراحل اولیه تحت فشار خزش سازند، آسان‌تر دچار تغییر شکل شود و جابه‌جایی به‌صورت متمرکز در این ناحیه اتفاق افتد. در مقابل، ناحیه پایینی به دلیل محدودیت هندسی و اتصال به کف چاه، مقاومت بیشتری در برابر جابه‌جایی نشان می‌دهد.

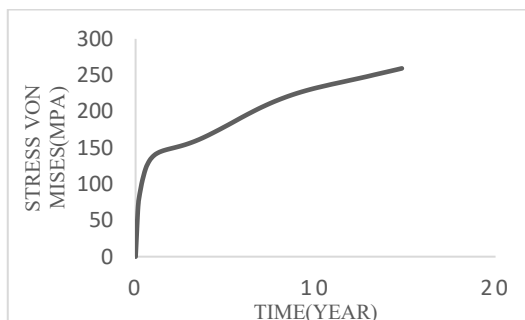
این رفتار، تأثیر موضعی و فضایی خزش سازند نمکی بر رفتار مکانیکی لوله جداري را به‌وضوح نشان می‌دهد حتی در غیاب هرگونه عامل خارجی. با گذشت زمان، این جابه‌جایی می‌تواند منجر به تغییر شکل دائمی و در نهایت کاهش ظرفیت باربری لوله جداري شود.



شکل ۱۴. کانتور تغییر شکل بدون در نظر گرفتن خوردگی در سال اول

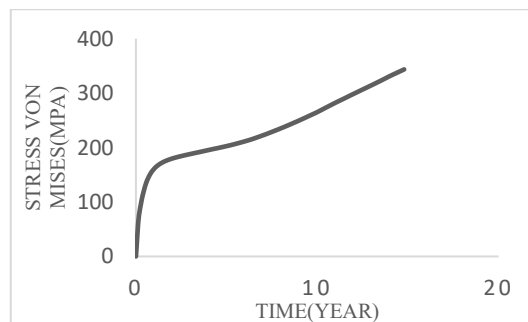


شکل ۱۵. کانتور تغییر شکل بدون در نظر گرفتن خوردگی در سال پنجم



شکل ۱۲. نمودار تنش فون مایز در نقطه ۶۵۸۱

تنش فون مایز برای شکل ۱۳ در نقطه ۶۶۴۳ نشان می‌دهد که این ناحیه با موقعیت پایینی در لوله جداري تحت تأثیر خزش سازند نمکی قرار گرفته است؛ با روند افزایش تنش که در ابتدا شدید و در ادامه پیوسته و بدون اشباع است. تنش از حدود ۵۰ مگاپاسکال در آغاز به ۳۴۰ مگاپاسکال در سال آخر رسیده است، با شیب بالا در دو سال اول و ادامه روند افزایشی با شیب ثابت در سال‌های بعد نشانه‌ای از انتقال مستمر بار از نواحی پایینی و عدم تشکیل تعادل نسبی در این ناحیه است. این الگو خزش نشان می‌دهد که تجمع تدریجی تنش در نواحی پایینی است با این حال، مقدار نهایی تنش ۳۴۰ مگاپاسکال نزدیک به حد تسلیم فولاد N-80 است و خطر تسلیم پلاستیکی را در افق زمانی طولانی‌تر افزایش می‌دهد.

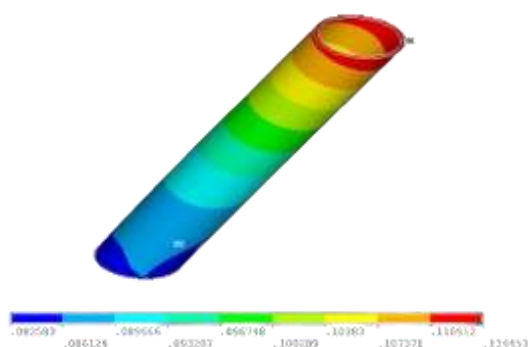


شکل ۱۳. نمودار تنش فون مایز در نقطه ۶۶۴۳

۲.۳. تغییر شکل^{۱۴} در لوله جداري:

تحلیل کانتور تغییر شکل لوله جداري نشان می‌دهد که بیشترین جابه‌جایی در ناحیه بالایی لوله جداري نزدیک به بالای چاه رخ داده است و با رنگ قرمز مشخص شده است، در حالی که ناحیه پایینی نزدیک به کف چاه با رنگ آبی، کمترین

^{۱۴} Deformation



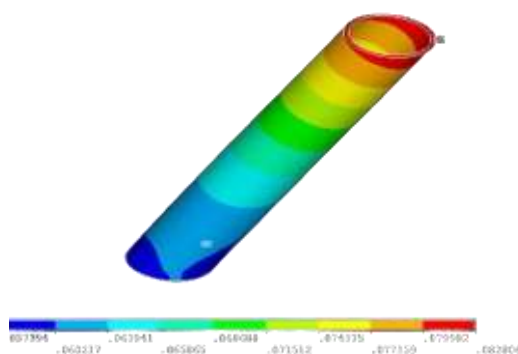
شکل ۱۷. کانتور تغییر شکل بدون در نظر گرفتن
خوردگی در سال چهاردهم

در شکل ۱۷ سال چهاردهم، کانتور تغییر شکل نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌ها به‌طور قابل‌توجهی نسبت به سال دهم افزایش یافته‌اند. حداکثر تغییر شکل به $11/45$ سانتی‌متر رسیده است و نواحی قرمز نشان‌دهنده بیشترین جابه‌جایی گسترده‌تر شده‌اند. توزیع رنگ قرمز همچنان غیرقرینه است به‌طوری‌که یک سمت حلقه بیشترین جابه‌جایی را نشان می‌دهد، اما هر دو سمت نسبت به سال دهم گسترش یافته‌اند. این الگو، تأثیر بلندمدت خزش سازند نمکی بر رفتار مکانیکی لوله جداری را به‌وضوح نشان می‌دهد. با گذشت زمان، تجمع تدریجی تغییر شکل منجر به گسترش نواحی حساس به‌ویژه در ناحیه بالایی لوله جداری شده است. افزایش وسعت نواحی قرمز، نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر برای تمرکز تنش و آغاز مچالگی موضعی در این مرحله است.

نمودار شکل ۱۸ تغییر شکل در نقطه 3565 که در ناحیه بالایی لوله جداری قرار دارد نشان می‌دهد که جابه‌جایی در طول زمان به‌صورت تدریجی و پیوسته افزایش یافته و به 12 سانتی‌متر رسیده است. این روند، ناشی از تغییر شکل تدریجی سازند نمکی و انتقال بار به نواحی بالایی است. این رفتار، توسعه پیوسته نواحی بحرانی و تمرکز جابه‌جایی در بخش‌های حساس لوله جداری را نشان می‌دهد که می‌تواند در مراحل بعدی منجر به مچالگی موضعی و تغییر شکل نامتوازن شود.

در سال پنجم، کانتور تغییر شکل نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌ها به‌صورت نسبی افزایش یافته‌اند. حداکثر تغییر شکل به $4/1796$ سانتی‌متر رسیده است و نواحی قرمز نشان‌دهنده بیشترین جابه‌جایی گسترش یافته‌اند، اما هنوز تمام محیط لوله جداری را پوشش نمی‌دهند. این الگو، تجمع تدریجی تنش و تغییر شکل در ناحیه بالایی لوله جداری را نشان می‌دهد ناشی از رفتار خزشی سازند نمکی و آزادی حرکت نسبی این ناحیه هست با این حال، سیستم هنوز از نظر تغییر شکل به وضعیت بحرانی نرسیده است.

همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، در سال دهم، افزایش قابل‌توجهی در جابه‌جایی‌ها مشاهده می‌شود. حداکثر تغییر شکل به $8/28$ سانتی‌متر می‌رسد و نواحی قرمز تمام محیط بالایی لوله جداری را پوشش می‌دهند. با این حال، توزیع رنگ قرمز غیرقرینه است به‌طوری‌که در یک طرف حلقه کمی پایین‌تر و در سمت دیگر بالاتر است. این عدم تقارن، نشان‌دهنده توزیع غیرهمگن بار ژئومکانیکی و تأثیر خزش سازند بر لوله جداری است که منجر به تشکیل نقاط حساس در طول محیط لوله جداری می‌شود. این رفتار، حساسیت مکانیکی لوله جداری به توزیع غیرهمگن تنش ناشی از خزش سازند را به‌وضوح نشان می‌دهد. با گذشت زمان، این نقاط حساس می‌توانند به ناحیه‌های بحرانی تبدیل شوند.

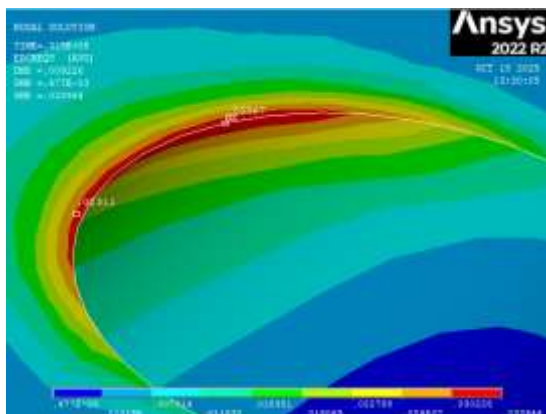


شکل ۱۶. کانتور تغییر شکل بدون در نظر گرفتن
خوردگی در سال دهم

ناچیز ۰/۰۰۰۴۷۷ است، در حالی که در ناحیه مجاور دیواره چاه، کرنش خزشی به حداکثر مقدار ۰/۰۳۳۹۴۴ می‌رسد. این تفاوت چشمگیر، بیانگر تمرکز تغییر شکل پلاستیک زمان‌بسته در ناحیه حفراهی است.

این الگو، ناشی از توزیع غیریکنواخت تنش‌های ژئومکانیکی در اطراف چاه است که در نزدیکی دیواره به دلیل اختلال در میدان تنش اولیه، گرادیان تنش بیشتری ایجاد می‌کند. در نتیجه، سازند نمکی در مجاورت چاه، حساسیت بسیار بالاتری نسبت به بارگذاری زمان‌بسته دارد و زودتر دچار رفتار خزشی می‌شود.

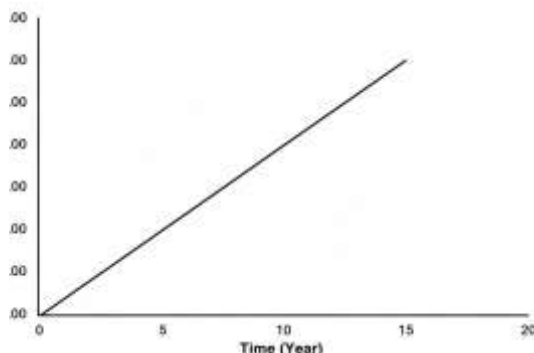
این یافته، نقش تعامل مکانیکی محلی بین لوله جداري و سازند را در فعال‌سازی خزش نمک به‌وضوح نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که حتی در مراحل اولیه، خزش سازند نمکی یک پدیده متمرکز و غیرخطی است و یک پاسخ یکنواخت در کل دامنه نمی‌باشد.



شکل ۱۹. توزیع کرنش خزش در سازند در سال اول

در سال پنجم، توزیع کرنش خزشی در سازند نمکی همچنان الگوی مشاهده‌شده در سال اول را دنبال می‌کند، اما با افزایش قابل‌توجه در شدت و گستردگی ناحیه خزشی. همان‌گونه که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، کمترین مقدار کرنش خزشی به ۰/۰۰۱۶۷۲ و بیشترین مقدار به ۰/۱۶۲۶۲۲ رسیده است، نشان‌دهنده رشد چشمگیر تغییر شکل پلاستیک زمان‌بسته در ناحیه مجاور چاه می‌باشد.

در مقایسه با سال اول، ناحیه تحت تأثیر خزش به‌تدریج گسترش یافته و به‌صورت یک حالت نیمه‌حلقه‌ای در اطراف



شکل ۱۸. نمودار تغییر شکل بدون در نظر گرفتن خوردگی در نقطه‌ی ۳۵۶۵ سال چهاردهم

نکته کلیدی مشاهده‌شده در نتایج، جداشدگی فضایی بین محل حداکثر تنش فون مایز و حداکثر جابه‌جایی است. در حالی که بیشترین جابه‌جایی در ناحیه بالایی لوله جداري رخ می‌دهد جایی که ساختار به‌دلیل آزادی حرکتی نسبی بیشترین انعطاف‌پذیری را دارد بیشترین تنش در ناحیه پایینی و در مجاورت سازند نمکی تمرکز یافته است، که مستقیماً تحت تأثیر فشار جانبی ژئومکانیکی و رفتار خزشی سازند قرار دارد. این تفاوت، ناشی از شرایط مرزی متفاوت و محدودیت‌های مکانیکی در طول ارتفاع لوله جداري است. در ناحیه پایینی، لوله جداري توسط سیمان و سازند محصور شده و به‌شدت تحت بار است، اما جابه‌جایی آن محدود است، در مقابل، ناحیه بالایی اگرچه تحت بار کمتری قرار دارد، اما به‌دلیل عدم مهار کامل، پاسخ جابه‌جایی‌محور دارد.

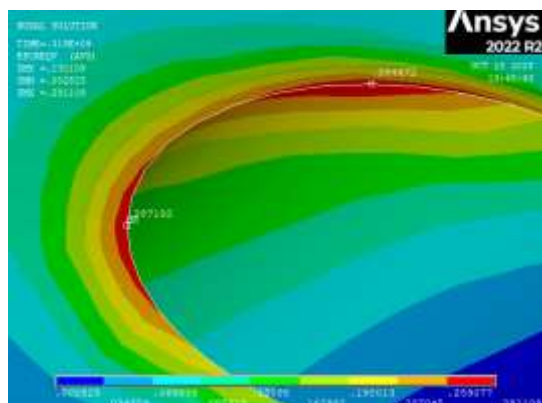
این یافته نشان می‌دهد که حداکثر جابه‌جایی لزوماً هم‌مکان با حداکثر تنش نیست و هر دو پارامتر، جنبه‌های مکمل و متفاوتی از پاسخ مکانیکی سیستم لوله جداري-سیمان-سازند را نشان می‌دهند. جابه‌جایی، نشان‌دهنده پایداری ساختاری کلی است، در حالی که تنش، خطر محلی تسلیم یا گسیختگی را فاش می‌کند. درک این تمایز، برای ارزیابی جامع یکپارچگی چاه در معرض خزش سازند نمکی ضروری است.

۳.۳. کرنش خزش^{۱۵} در نمک:

در سال اول شبیه‌سازی، توزیع کرنش خزشی در سازند نمکی نشان می‌دهد که رفتار خزشی به‌طور چشمگیری وابسته به فاصله از چاه است. در نواحی دور از چاه، کرنش خزشی تقریباً

¹⁵ Creep strain

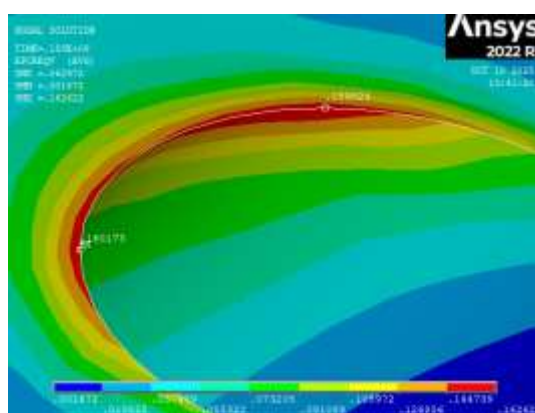
دچار تغییر شکل می شود بدون اینکه رفتار آن به صورت ناگهانی یا یکنواخت در کل دامنه ظاهر شود. این یافته، اهمیت در نظر گرفتن رفتار وابسته به زمان سازند در ارزیابی بلندمدت یکپارچگی چاه را به وضوح برجسته می کند.



شکل ۲۱. توزیع کرنش خزش در سازند در سال دهم

در شکل ۲۲ سال چهاردهم، توزیع کرنش خزشی بیشترین شدت و تمرکز خود را نشان می دهد، سازند نمکی در نواحی دور از چاه همچنان رفتاری تقریباً الاستیک دارد و کرنش خزشی در این نواحی ناچیز باقی مانده است. در مقابل، ناحیه مجاور دیواره چاه همچنان محل تمرکز اصلی خزش است و بیشترین مقادیر کرنش پلاستیک زمان بسته را ثبت کرده است. این الگو تأیید می کند که حتی پس از ۱۴ سال، خزش سازند نمکی یک پدیده کاملاً محلی باقی مانده است که ناشی از گرادیان شدید تنش در اطراف چاه و حساسیت بالای نمک به بارگذاری طولانی مدت است. در این ناحیه، تغییر شکل پلاستیک به تدریج انباشته شده و هنوز نشانه ای از اشباع یا توقف روند خزش دیده نمی شود. این رفتار پایدار و پیشرونده، نشان دهنده تداوم تخریب مکانیکی سازند در مجاورت چاه است. در مجموع، یافته ها بیانگر این است که زمان، به عنوان یک پارامتر کلیدی، نقش تعیین کننده ای در تکامل رفتار خزشی سازند نمکی دارد و پیش بینی بلندمدت یکپارچگی چاه بدون در نظر گرفتن این رفتار، می تواند منجر به تحلیل های بهینه نگر و غیرایمن شود.

لوله جداری قابل مشاهده است. این گسترش، بیانگر تجمع تدریجی تغییر شکل ناشی از بارگذاری ژئومکانیکی طولانی مدت است. با این حال، نواحی دور از چاه همچنان کرنش خزشی بسیار ناچیزی نشان می دهند، که تأیید می کند خزش سازند نمکی همچنان یک پدیده محلی و متمرکز است. این یافته نشان می دهد که سازند نمکی در مجاورت چاه، به دلیل قرارگیری در میدان تنش پر تغییر، به سرعت ترین پاسخ خزشی را از خود نشان می دهد، در حالی که بقیه دامنه به دلیل پایداری تنش های برجا، همچنان در حالت الاستیک یا شبه الاستیک باقی مانده اند.

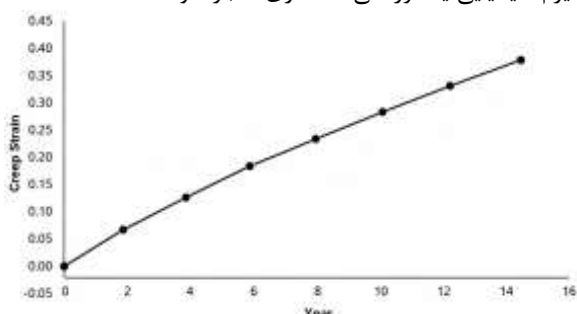


شکل ۲۰. توزیع کرنش خزش در سازند در سال پنجم

در سال دهم، توزیع کرنش خزشی همچنان الگوی محلی و متمرکز مشاهده شده در سال های پنجم و اول را حفظ می کند، اما با رشد چشمگیر در شدت و گستردگی ناحیه تحت تأثیر کمترین مقدار کرنش خزشی در این مرحله ۰/۰۰۲۸۲۳ و بیشترین مقدار آن به ۰/۲۹۱۱۰۹ رسیده است که نشان دهنده افزایش بیش از دو برابری در حداکثر کرنش نسبت به سال پنجم است.

ناحیه با کرنش بالا که در نمودارها با طیف های میانی رنگی نشان داده می شود تدریجاً در اطراف چاه گسترش یافته و اکنون یک لایه پیوسته تر از سازند را دربر می گیرد. این گسترش، بیانگر تجمع تدریجی تغییر شکل پلاستیک ناشی از بارگذاری ژئومکانیکی طولانی مدت است. با این حال، نواحی دور از چاه همچنان کرنش خزشی بسیار ناچیزی (نزدیک به صفر) دارند، که نشان دهنده محلی بودن پاسخ خزشی حتی پس از ۱۰ سال است. این روند تدریجی و غیرخطی نشان می دهد که سازند نمکی تحت تأثیر خزش، به آرامی اما پیوسته

می‌دهد که تغییر شکل تجمعی می‌تواند در افق زمانی طولانی‌تر، به افزایش خطر ناپایداری حتی در غیاب هرگونه مکانیزم شیمیایی یا خوردگی ساختاری منجر شود.

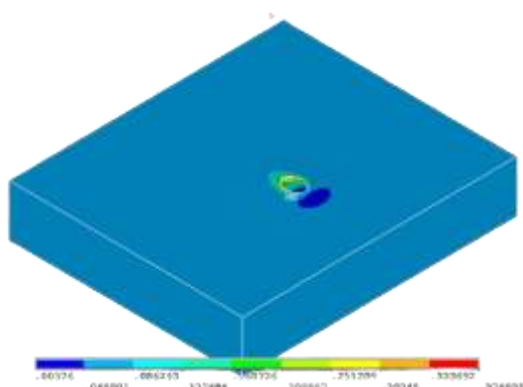


شکل ۲۳. روند تغییر کرنش خزش نقطه ۳۵۵۵ در
سال چهاردهم

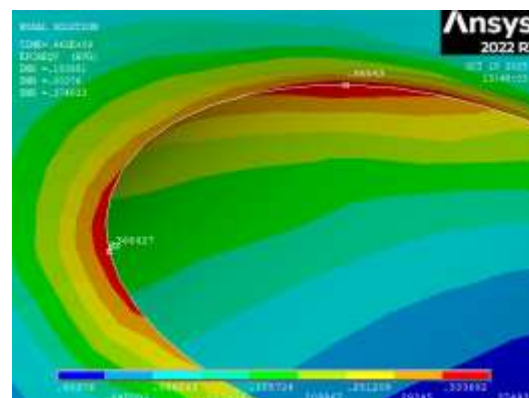
شواهد میدانی مؤید آن است که این چاه در اکتبر ۲۰۰۰ به بهره‌برداری رسیده است. پس از اعمال تحریم‌های نفتی علیه ایران در سال ۲۰۱۲، شرکت نفت فلات قاره ایران استراتژی کاهش تولید نفت را اجرا کرد. مدت کوتاهی پس از بسته شدن چاه، عملیات تعمیر چاه ۱۶ در دستور کار قرار گرفت. در نخستین عملیات تعمیر چاه که پس از این دوره توقف انجام شد، یک مانع فیزیکی کاملاً مشهود در عمق آغازین لایه نمکی (تقریباً در ژرفای ۱۲۰۰ متری) شناسایی گردید؛ به‌گونه‌ای که ابزارهای با قطر ۱۰۵ اینچ نیز توانایی عبور از این نقطه را نداشته و عملاً چاه در آن مقطع کاملاً مسدود شده بود. این پدیده میدانی (تشکیل مانع ناشی از مچالگی جداره) دقیقاً منطبق با پیش‌بینی مدل عددی مبتنی بر رفتار ویسکوالاستوپلاستیک نمک است. مدل به‌دروستی پیش‌بینی می‌کرد که در اثر کاهش فشار هیدرواستاتیک ستون سیال (ناشی از بسته بودن طولانی‌مدت چاه) و ماهیت خزشی نمک، نرخ همگرایی جداره به شدت افزایش یافته و در بازه زمانی مذکور، قطر چاه به حداقل بحرانی می‌رسد. تطابق مکان وقوع (دقیقاً ابتدای لایه نمکی)، زمان وقوع (پس از دوره توقف تولید) و شدت انسداد (عدم عبور ابزار ۱۰۵ اینچی) با خروجی‌های مدل، گواهی قاطع بر عملکرد صحیح شبیه‌سازی در بازتولید شرایط واقعی میدان است.

۴. تحلیل عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های مدل‌سازی

هر مدل عددی در ژئومکانیک، برگرفته از چکیده‌ای از واقعیت



شکل ۲۲. توزیع کرنش خزش در سازند در سال
چهاردهم نمای دور و نمای نزدیک



نمودار کرنش خزشی در نقطه ۳۵۵۵ واقع در ناحیه مجاور دیواره چاه روندی تدریجی، پیوسته و تکاملی را در طول ۱۴ سال نشان می‌دهد. حداکثر مقدار کرنش خزشی در این نقطه به ۰/۳۸ می‌رسد، که بیانگر تجمع پایدار تغییر شکل پلاستیک زمان‌بسته ناشی از بارگذاری ژئومکانیکی طولانی‌مدت است. این روند فاقد هرگونه رفتار ناگهانی، شکست یا غیرخطی شدید است و نشان می‌دهد که سازند نمکی در این ناحیه تحت یک فرآیند خزش کنترل‌شده و غیرسریع قرار دارد. این رفتار، همسو با الگوی کلی نمودارهای مشاهده‌شده است و تأیید می‌کند که خزش سازند نمکی در مجاورت چاه، یک پدیده تدریجی اما تداوم‌دار است. وجود چنین روند پایداری، هرچند نشان‌دهنده عدم فروپاشی ناگهانی است، اما هشدار

پیچیده است و شناخت مرزهای اعتبار آن، نه تنها یک الزام علمی، بلکه نشان‌دهنده درک عمیق پژوهشگر از ماهیت مسئله می‌باشد. در این مطالعه، با وجود دقت بالا در کالیبراسیون و صحت‌سنجی، محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های ذیل قابل تفکیک و بررسی هستند:

• عدم قطعیت در پارامترهای رئولوژیک (رفتار خزشی نمک):

رفتار ویسکوالاستوپلاستیک نمک به شدت وابسته به دما، نرخ کرنش، و تاریخچه تنش است. پارامترهای مدل خزشی معمولاً با پراکندگی آزمایشگاهی قابل توجهی همراه هستند. در این پژوهش، برای مهار این عدم قطعیت، از دامنه‌ای از مقادیر گزارش‌شده در ادبیات فنی برای میادین مشابه استفاده شده و سناریوی بحرانی (بدبینانه) جهت طراحی لوله جداری مبنا قرار گرفته است. با این حال، قطعی‌سازی دقیق‌تر این پارامترها مستلزم انجام آزمایش‌های خزش بر روی مغزه‌های واقعی از همین میدان است.

• فرض همگنی و نادیده گرفتن تغییرات مکانی خواص:

مدل عددی به دلیل محدودیت‌های محاسباتی و داده‌ای، برخی لایه‌ها را به صورت همگن در نظر گرفته است؛ در حالی که در محیط واقعی، تغییرات رخساره‌ای و ناهمگنی‌های ریزشکه (ریز ترکها) می‌توانند بر توزیع تنش مؤثر باشند. برای مدیریت این موضوع، بحرانی‌ترین بازه (مقطع آغازین لایه نمکی) با ریزترین شبکه‌بندی ممکن مدل شده و اثر تغییرات خصوصیات در قالب تحلیل حساسیت محلی بررسی گردیده است تا حداکثر خطای احتمالی برآورد شود.

• وابستگی به دقت مدل یک‌بعدی مکانیک زمین

نتایج مدل عددی به عنوان تابعی از شرایط مرزی (مقادیر تنش‌های برجا و فشار منفذی لایه‌های مجاور) وابستگی مستقیم دارد. هرچند که مدل یک‌بعدی مکانیکی زمین با

داده‌های معتبر LOT و XLOT کالیبره شده است، اما خطای ذاتی در برآورد تنش افقی حداکثر (تخمینی از روی روابط تجربی) همچنان باقی است. این عدم قطعیت در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن ضریب اطمینان طراحی در ارزیابی عملکرد لوله جداری لحاظ شده است.

• محدودیت داده‌های میدانی و آزمایشگاهی

دسترسی به داده‌های پیوسته در طول بهره‌برداری (نظیر نرخ مچالگی ممتد) میسر نبوده و صحت‌سنجی تنها بر اساس یک رویداد میدانی (انسداد گزارش‌شده در عمق ۱۲۰۰ متری) استوار است. اگرچه این رویداد گواهی محکم بر صحت روند اصلی مدل است، اما کالیبره‌سازی زمان‌مند¹⁷ نیازمند داده‌های بیشتری از چاه‌های مجاور است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر خزش سازند نمکی به عنوان یک مکانیزم مستقل و وابسته به زمان، بر رفتار مکانیکی لوله جداری در سازند فارس پایینی خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به یک مدل واقع‌گرایانه، ابتدا یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی بر اساس داده‌های واقعی یک چاه در خلیج فارس توسعه داده شد و خروجی‌های آن شامل تنش‌های برجا، فشار منفذی و خواص مکانیکی سازند به عنوان ورودی برای شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار ANSYS مورد استفاده قرار گرفت.

• تحلیل نتایج در بازه زمانی ۱۴ ساله نشان داد که خزش سازند نمکی به‌تنهایی حتی در غیاب هرگونه عامل خارجی مانند خوردگی، فشار داخلی غیرعادی یا نوسانات حرارتی می‌تواند منجر به افزایش تدریجی و قابل توجه تنش فون مایز در لوله جداری شود.

• حداکثر تنش در نقاط حساس (مانند نقطه ۴۱۶۳ در ناحیه پایینی) به ۵۶۰ مگاپاسکال رسید مقداری نزدیک به حد تسلیم فولاد N-80 که خطر تسلیم

¹⁷ Time-dependent

[2] Ge, W., Chen, M., Jin, Y., Zhang, F., Lu, Y., Yang, P., Ding, J. and Zeng, H. (2011). Analysis of the external pressure on casings induced by salt-gypsum creep in build-up sections for horizontal wells. *Rock mechanics and rock engineering*, 44(6), pp.711-723.

[3] Zhong, L., Cong, H., Wang, S., Zhao, D., Wang, Z. and Yang, G. (2008). Deep salt formation wells successfully drilled with integrated techniques in Tahe Oilfield. In *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition?* (pp. SPE-115208). SPE.

[4] Abdideh, M. and Hedayati Khah, S. (2018). Analytical and numerical study of casing collapse in Iranian oil field. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), pp.1723-1734.

[5] Gu, C., Xiang, M., Li, M., Zhu, H., Zhang, Q., Xing, Z., Wang, M., Zhang, Z. and Yan, C. (2025). The casing collapse mechanism in salt formations in deepwater fields in Brazil. *Processes*, 13(2), p.301.

[6] Kaldal, G.S., Jónsson, M.P., Pálsson, H. and Karlsdóttir, S.N. (2013). Collapse analysis of the casing in high temperature geothermal wells. In *Proceedings, 38th workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University, Stanford, CA, SGP-TR-198* (pp. 11-13).

[7] Shen, X. and Shen, G. (2014). Poro-Elasto-Plastic Calculation on Fault Reactivation Caused by Hydraulic Fracturing in a Field Offshore West Africa. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2014). ARMA.

[8] Wang, H.Y. and Samuel, R. (2013). Geomechanical modeling of wellbore stability in salt formations. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (p. D031S047R006). SPE.

[9] Guo, X., Li, J., Liu, G., Lian, W., Zeng, Y., Tao, Q. and Song, X. (2018). Shale experiment and numerical investigation of casing deformation during volume fracturing. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(22), p.723.

[10] Al-Hasnawi, A.N.A., Hosseinian, A., Faraj, A.K. and Salih, A.K. (2024). Casing collapse and salt creeping for an Iraqi oil field: implications for mitigation. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 14(2), pp.31-44.

[11] Bowers, G.L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, 10(02), pp.89-95.

پلاستیکی یا آغاز مچالگی را در افق زمانی طولانی‌تر افزایش می‌دهد.

- هم‌زمان، تحلیل جابه‌جایی نشان داد که بیشترین تغییر شکل در ناحیه بالایی لوله جداری رخ می‌دهد (تا ۱۱/۴۵ سانتی‌متر در سال چهاردهم)، که ناشی از آزادی حرکتی نسبی این ناحیه است. این یافته، تمایز فیزیکی بین توزیع تنش و جابه‌جایی را آشکار می‌سازد در حالی که حداکثر تنش در ناحیه پایینی (محدود و تحت بار) متمرکز است، حداکثر جابه‌جایی در ناحیه بالایی (آزاد و انعطاف‌پذیر) رخ می‌دهد.

- علاوه بر این، تحلیل کرنش خزشی در سازند نمکی تأیید کرد که خزش یک پدیده کاملاً محلی است متمرکز در ناحیه مجاور دیواره چاه و در طول ۱۴ سال به‌صورت تدریجی، پیوسته و غیرخطی رشد می‌کند، بدون هیچ نشانه‌ای از اشباع یا توقف که این رفتار، منجر به تجمع تغییرشکل پلاستیک و افزایش فشار جانبی مؤثر بر لوله جداری می‌شود.
- این پژوهش به‌وضوح تأیید می‌کند که خزش سازند نمکی یک تهدید مکانیکی مستقل و بلندمدت برای یکپارچگی ساختاری چاه است.

- این یافته‌ها هشدار می‌دهند که طراحی‌های سنتی لوله جداری که تنها بر تحلیل‌های الاستاتیکی مبتنی بر شرایط اولیه تکیه می‌کنند، ممکن است در بلندمدت غیرایمن باشند. بنابراین، شبیه‌سازی‌های زمان‌بسته مبتنی بر خزش سازند باید به‌عنوان بخشی ضروری در ارزیابی‌های مهندسی چاه‌های عبوری از لایه‌های نمکی در نظر گرفته شوند.

۶. مراجع

[1] Veeken, C.A.M., Wahleitner, J.P. and Keedy, C.R. (1994). August. Experimental modelling of casing deformation in a compacting reservoir. In *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering* (pp. SPE-28090). SPE.

- [12] Azadpour, M., Manaman, N.S., Kadkhodaie-Ilkhchi, A. and Sedghipour, M.R. (2015). Pore pressure prediction and modeling using well-logging data in one of the gas fields in south of Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 128, pp.15-23. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.02.022>
- [13] Eaton, B.A. (1975). The equation for geopressure prediction from well logs. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (pp. SPE-5544). SPE.
- [14] Liu, Y., Feng, M., Sun, G., Liu, Z., Ma, C., Zhong, X., Wang, L. and Liao, Y. (2019). Casing failure characteristics, prevention and control strategies for mature oilfields. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 267, No. 4, p. 042153). IOP Publishing.
- [15] Gheibi, S., Agofack, N. and Sangesland, S. (2021). Modified discrete element method (MDEM) as a numerical tool for cement sheath integrity in wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, p.107720.
- [16] Amiri, M., Lashkaripour, G.R., Ghabezloo, S., Moghaddas, N.H. and Tajareh, M.H. (2019). Mechanical earth modeling and fault reactivation analysis for CO₂-enhanced oil recovery in Gachsaran oil field, south-west of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(4), p.112.
- [17] Taheri, S.R., Pak, A., Shad, S., Mehrgini, B. and Razifar, M. (2020). Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(3), pp.357-365.
- [18] Amiri, M., Khosravifard, A., Riazi, M., Veiskarami, M., Adoko, A.C., Amerian, D., Rahimi, A., Shiroodi, S.K., Saeidi, O., Rahbar, M. and Alavi, F. (2026). Impact of Salt Creep and Well Shut-Down on Casing Collapse in the Lower Fars Formation, Southern Iran. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp.1-24. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-05197>