

# تأثیر نوسانات فشار بر شکست هیدرولیکی در تونل‌های تحت فشار با روباره کم

مهرداد کرمی<sup>1</sup>، عبدالرضا کبیری سامانی<sup>2\*</sup> و راحب باقرپور<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* akabiri@cc.iut.ac.ir

**چکیده** - در تحقیق حاضر با استفاده از روش اجزای محدود، اندرکنش سیال، سازه و سنگ در تونل تحت فشاری با پوشش بتنی در حالت دوبعدی مدل‌سازی می‌شود. سیال داخل تونل با استفاده از المان‌های آکوستیک که قابلیت شبیه‌سازی فشارهای هیدرودینامیکی را دارند، مدل‌سازی می‌شود. با اعمال فشار در دو حالت پایدار و گذرا و در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه، به بررسی نحوه ترک‌خوردگی سنگ اطراف پوشش به‌عنوان مستعدترین مکان برای بروز این پدیده مخرب پرداخته می‌شود. برای تحلیل جریان سیال در دو حالت پایدار و گذرا از نرم‌افزار HAMMER استفاده می‌شود. سپس بارگذاری‌های هیدرولیکی، به‌منظور تحلیل تنش به نرم‌افزار ABAQUS انتقال داده می‌شود. برای بررسی ترک‌خوردگی المان‌های سنگ اطراف پوشش از معیار شکست موهر-کولمب استفاده می‌شود. با اعمال فشار آب به تونل در حالت پایدار، حداقل میزان روباره برای ترک نخوردن سنگ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت با تغییر روباره موجود در روی تونل به بررسی تأثیر افزایش ارتفاع روباره بر شکست هیدرولیکی، در صورت بروز جریان‌های گذرا در داخل تونل پرداخته می‌شود و نتایج در قالب نمودارهایی ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در حالت جریان گذرا، افزایش روباره الزاماً راه‌کاری ایمن برای جلوگیری از بروز پدیده مخرب شکست هیدرولیکی نیست.

**کلیدواژگان:** تونل تحت فشار، شکست هیدرولیکی، فشارهای گذرا، اندرکنش سازه و سیال، روباره.

## 1- مقدمه

ناپایداری شده و یا اصطلاحاً دچار شکست هیدرولیکی می‌شود. محققین بسیاری از جنبه‌های گوناگون نظیر تخمین روباره، نشت و تعیین نوع پوشش به بررسی مسأله شکست هیدرولیکی پرداخته‌اند (ترزاقی 1962، اشلایس<sup>1</sup> 1982، مینگ و همکاران<sup>2</sup> 2010 و مون و جنونگ<sup>3</sup> 2011)

در تونل‌های آب‌بری که تحت فشار داخلی آب قرار دارند، در قسمت‌هایی که عمق روباره کم است و پوشش نفوذپذیر است، گاه فشار داخلی آب، بر وزن روباره غالب شده و به‌دلیل نفوذپذیری پوشش، فشار آب به داخل درزه‌ها و ناپیوستگی‌های سنگ نفوذ کرده و این درزه‌ها را توسعه می‌دهد. در این هنگام توده سنگ روی تونل دچار

<sup>1</sup> Schleiss

<sup>2</sup> Ming et al.

<sup>3</sup> Moon and Jeong

همکاران<sup>5</sup> (2014) با استفاده از روش اجزای محدود با در نظر گرفتن تنش‌های برجای غیریکنواخت در اطراف تونل به بررسی جابجایی‌ها و تنش‌های به‌وجود آمده در پوشش و سنگ در اثر بارگذاری هیدرواستاتیکی پرداختند (Simanjuntak et al., 2014). ژو و همکاران (2015) با در نظر گرفتن اندرکنش بین سیال و پوشش، به بررسی تنش‌های به‌وجود آمده در پوشش بتنی مسلح در تونل‌های تحت فشار بالا پرداختند. ایشان با شبیه‌سازی جریان سیال در درزه‌ها و ترک‌های به‌وجود آمده در پوشش مسلح، رفتار هیدرومکانیکی سنگ اطراف و پوشش تونل را به‌طور هم‌زمان لحاظ نمودند (Zhou and Wu 2015).

گاهی در تونل‌های انتقال آب، تحت شرایطی باید دریچه‌ها به سرعت باز یا بسته شوند. این تغییر وضعیت سریع دریچه، باعث به‌وجود آمدن امواج فشاری در طول تونل می‌گردد و ممکن است یک تونل انتقال آب، تحت فشار هیدرواستاتیکی به‌خوبی به عمل کرد خود ادامه دهد، اما با به‌وجود آمدن امواج فشاری ناگهانی دچار پدیده شکست هیدرولیکی گردد. بیشتر محققان پدیده شکست هیدرولیکی را بدون در نظر گرفتن اثرات فشارهای دینامیکی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در تحقیق حاضر تأثیر این عامل در پدیده شکست هیدرولیکی بررسی خواهد شد. از آنجا که موضوع مورد بررسی شامل دو بخش تحلیل هیدرولیکی جریان آب داخل تونل در اثر بسته شدن دریچه و اثرات این تغییر بر دیواره تونل و سنگ اطراف آن است، از دو نرم‌افزار HAMMER و ABAQUS برای مدل‌سازی و تحلیل استفاده می‌شود. با مدل‌سازی‌های لازم، نتایج تحلیل هیدرولیکی از نرم‌افزار HAMMER استخراج و به‌عنوان داده ورودی برای تحلیل تنش در نرم‌افزار ABAQUS وارد خواهد شد.

## 2- مبانی تئوری و روش حل

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود و در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ در نرم‌افزار ABAQUS به بررسی تنش‌ها و جابجایی‌ها در اطراف تونل انتقال آب تحت فشار پرداخته می‌شود. سپس با اعمال فشار سیال در

و آنجلکویک و همکاران<sup>1</sup> (2013) (نقل از Zhou and Wu, 2015). اشلایس (1986) با استفاده از تئوری نشت از استوانه جدار ضخیم و نیز منظور کردن تراز آب زیرزمینی به بررسی نشت از تونل‌های تحت فشار پرداخت (Schleiss, 1986). وی با بررسی پوشش بتنی در دو حالت ترک‌دار و بدون ترک، روابطی را برای تعیین فشار ناشی از نشت ارائه کرد. وی معتقد بود که فشارهای دینامیکی ناشی از عوامل گوناگون، مانند ضربه قوچ در میزان نشت و بازشدگی درزه‌ها تأثیر به‌سزایی دارند، ولی معیاری برای آن‌ها بیان نکرد. فرناندز و آلوارز<sup>2</sup> (1994) با استفاده از روش اجزای محدود، حل عددی برای نشت آب از تونل و تنش مؤثر ناشی از نشت را ارائه کردند. ایشان نسبت تنش‌های مؤثر برجای زمین به تنش‌های مؤثر ناشی از نشت را به‌عنوان ضریب اطمینان در مقابل پدیده شکست هیدرولیکی در نظر گرفتند (Fernandez and Alvarez, 1994). بوبت (2006) با استفاده از روش اجزای محدود، تنش‌های مؤثر اطراف تونل تحت فشار را مورد بررسی قرار داد. وی فرض کرد که زمین اطراف تونل خشک است و اثرات آب زیرزمینی را در فرضیات خود وارد نکرد (Bobet and Nam, 2007). هاجم<sup>3</sup> و اشلایس (2010) در دو حالت با و بدون لحاظ کردن اندرکنش بین سیال-سازه به بررسی سرعت موج فشاری در تونل‌های تحت فشار با پوشش فولادی پرداختند (Hachem and Schleiss, 2009). ایشان تغییرات سرعت موج فشاری را با توجه به جنس سنگ، ضخامت جداره و فرکانس موج، در قالب نمودارهایی ارائه نمودند. اولومید و مارنس<sup>4</sup> (2012) با شبیه‌سازی تونل تحت فشار، در فضایی دوبعدی و الاستوپلاستیک، به روش اجزای محدود به مطالعه اثر پوشش اطراف تونل پرداختند. هدف بهینه کردن پوشش اطراف تونل تحت فشار بود. ایشان با کوپل کردن تنش محیط با تنش ناشی از نشت به بررسی ترک‌های ایجاد شده در پوشش پرداختند (Olumide and Marenc, 2012). آن‌ها در نهایت مدل عددی خود را با روش تحلیلی که توسط اشلایس (1986) ارائه شده بود، صحت‌سنجی کردند. سیمانجونتاک و

<sup>1</sup> Andjelkovic et al.

<sup>2</sup> Alvarez

<sup>3</sup> Hachem

<sup>4</sup> Olumid and Marenc

<sup>5</sup> Simanjuntak et al.

آمده بر روی پوشش ناشی از این فشار ارتباط پیدا می‌کنند. رابطه فوق با گسسته‌سازی المان محدود و اعمال شرایط مرزی و اولیه، توسط نرم‌افزار ABAQUS حل می‌شود. در نهایت جابجایی‌های به‌وجود آمده در پوشش محاسبه و به‌وسیله آن تنش‌های حاصل از این فشارهای هیدرودینامیکی در پوشش تعیین می‌شود. در اثر نیروهای ایجاد شده در پوشش، بخشی از این نیرو به سنگ اطراف انتقال داده می‌شود و سنگ فشار هیدرودینامیکی سیال را تحمل می‌کند. در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی اندرکنش سازه و سنگ از روش مستقیم استفاده شده است که در آن در فاصله دور از محل تماس سنگ و سازه، شرایط مرزی مصنوعی در نظر گرفته می‌شود. در واقع این مرزهای مصنوعی باید به‌گونه‌ای قرار گیرند که تأثیری بر روی منطقه نزدیک سازه نداشته باشند. در نتیجه معادله تعادل حاکم بر پاسخ دینامیکی خطی این سیستم به‌صورت زیر است (ABAQUS, 2012):

$$[M]\{\ddot{u}_r\} + [C]\{\dot{u}_r\} + [K]\{u_r\} = \{R_r\} \quad (5)$$

که در آن  $M$ ،  $C$  و  $K$  به‌ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی،  $R_r$  بردار نیروهای خارجی وارد بر سنگ و  $u_r$ ،  $\dot{u}_r$  و  $\ddot{u}_r$  به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی المان‌های سنگ است.  $R_r$  ناشی از فشار هیدرودینامیکی سیال است که در مرز مشترک سیال و پوشش به‌وجود می‌آید و کل سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع  $\{R_r\} = \{f\} - \{f_s\}$  است. به این معنا که بخشی از نیروی هیدرودینامیک توسط پوشش تحمل می‌شود. به این ترتیب ارتباط بین فشار هیدرودینامیکی و سنگ اطراف به کمک معادلات (4) و (5) برقرار می‌شود (ABAQUS, 2012).

## 2-2- مدل‌سازی و پارامترهای مؤثر

فاصله مرزهای مدل باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که تأثیری بر روی نحوه توزیع تنش در اطراف تونل نداشته باشد. بر این اساس و با استفاده از یک فرآیند سعی و خطای طولانی ابعاد مدل  $6d \times 25d$  انتخاب گردید ( $d$  قطر تونل است، شکل 1).

حالت‌های پایدار و گذرا به جداره‌های تونل و در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه، به بررسی تغییرات تنش و جابجایی‌های اطراف تونل و شکست‌های احتمالی ناشی از فشار سیال پرداخته می‌شود. در نهایت میزان روباره لازم برای جلوگیری از وقوع شکست هیدرولیکی و جاکنش آبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## 2-1- معادلات حاکم

با استفاده از معادله کلی ناویر-استوکس رابطه (1) و با استفاده از فرضیات ساده کننده: الف) سیال داخل تونل غیرلزج است، ب) حرکت با دامنه کم و صرف‌نظر کردن از نوسانات سرعت سیال، ج) تراکم پذیری خطی سیال و ساده‌سازی‌های لازم، معادله دینامیکی جریان داخل تونل به‌صورت رابطه (2) درخواهد آمد (ABAQUS, 2012).

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (2)$$

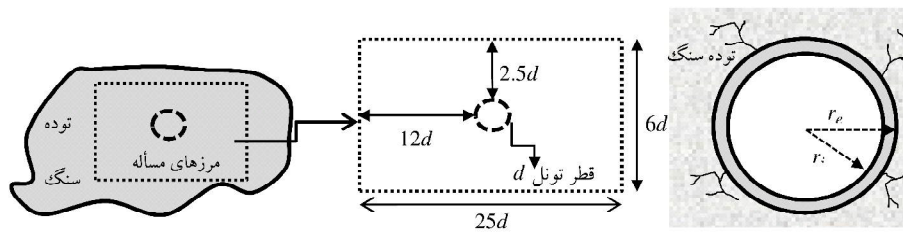
در معادلات بالا،  $\mathbf{v}$  میدان سرعت در سیال،  $\mu$  لزجت سیال،  $\mathbf{B}$  بردار نیروهای بدنی،  $p$  فشار هیدرودینامیکی سیال داخل تونل و  $K$  مدول بالک سیال است. تنها شرط مرزی حاکم بر سیال داخل تونل در مرز مشترک بین آب و پوشش است. این شرط مرزی به‌صورت رابطه (3) تعریف می‌شود (ABAQUS, 2012):

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_s \quad (3)$$

در این رابطه  $n$  بردار یکه عمود بر سطح مشترک و  $\ddot{u}_s$  شتاب پوشش است. رابطه فوق بر این اصل استوار است که سرعت سیال و پوشش در جهت عمود بر فصل مشترک یکسان است. لذا سرعت نسبی در سطح تماس به‌وجود نخواهد آمد. ارتباط بین فشار هیدرودینامیکی درون تونل  $\{p\}$ ، با نیروهای اعمال شده بر روی پوشش ناشی از فشار هیدرودینامیکی  $\{f\}$  توسط ماتریس کوپله  $[Q]$  برقرار می‌شود (ABAQUS, 2012):

$$[Q]\{p\} = \{f\} \quad (4)$$

به‌وسیله ماتریس کوپله  $[Q]$ ، فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از بسته‌شدن سریع دریچه‌ها با نیروهای به‌وجود



شکل 1 هندسه توده سنگ، مقطع حفاری و پوشش

تغییرات فشار آب درون تونل با زمان، از نرم‌افزار HAMMER استخراج و به عنوان شرایط اولیه فشار برای المان‌های آکوستیک لحاظ می‌گردد. به این ترتیب اگر در زمان

$t = t_0$  فشار هیدرودینامیکی المان‌های سیال داخل تونل  $P_0$  باشد، این فشار توسط المان‌های آکوستیک به المان‌های پوشش وارد خواهد شد. سپس با توجه به رابطه (5) فشار المان‌های آکوستیک با فشار مقاوم المان‌های سازه‌ای به یکدیگر وابسته می‌شوند و در نهایت با توجه به رابطه تعادل دینامیکی، منجر به جابجایی‌هایی در مدل خواهند شد. این موضوع سبب می‌شود تا مسأله اندرکنش سازه و سیال به صورت موضوعی دوسویه در مدل‌سازی لحاظ شود. تنها درجه آزادی درون یک تونل انتقال که با آب پر شده است، مقدار فشار در گره‌های مدل المان محدود سیال است. در نرم‌افزار ABAQUS، محیط و مصالح آکوستیک<sup>1</sup> دارای این خصوصیت بوده و برای مدل‌سازی سیال درون تونل مناسب هستند (ABAQUS, 2012). در نتیجه توانایی مدل‌سازی انتقال امواج فشاری را دارا است. محیط آکوستیک یک محیط الاستیک است که در آن تنش برشی وجود نداشته و فشار متناسب با کرنش حجمی است. المان‌های آکوستیک اثرات اینرسی و تراکم‌پذیری سیال را مدل‌سازی می‌کنند. همچنین این المان‌ها قابلیت شبیه‌سازی انتشار امواج را نیز دارا هستند. چگالی سیال 1000 کیلوگرم بر مترمکعب و مدول بالک 2/07 گیگا پاسکال در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی دو نوع اندرکنش منظور می‌شود: الف) برهم‌کنش سیال - سازه (آب داخل تونل و پوشش)، ب) برهم‌کنش سازه و سنگ (پوشش بر سنگ اطراف تونل). برای در نظر گرفتن اندرکنش بین سیال و پوشش، نرم‌افزار ABAQUS راه‌حل کلی و خاصی را در نظر می‌گیرد. برای

مرزهای چپ و راست مدل به صورت تکیه‌گاه غلتکی در راستای افقی بسته شده و مرزهای کف مدل نیز در راستای افقی و عمودی مقید شدند. خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ با توجه به ویژگی‌های سنگ تونل انتقال آب گلاب انتخاب گردیده است (صانعی‌آرانی، 1391). مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی پوشش بتنی با توجه به آیین-نامه ACI-31808 انتخاب گردید. برای مدل‌سازی سنگ به روش موهر-کولمب، پارامترهای مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی، چسبندگی و زاویه اصطکاک استفاده شدند (جدول 1). لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی از پارامترهای استاتیکی مصالح استفاده شده است. خصوصیات دینامیک مصالح معمولاً بیشتر از حالت استاتیکی است، از این رو نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر مقادیر بحرانی را نشان می‌دهند.

با توجه به این که برای شبیه‌سازی سیال داخل تونل از المان‌های خانواده آکوستیک نرم‌افزار استفاده شده است، ویژگی این المان‌ها، انتقال و تبادل فشارهای هیدرودینامیکی است. به عبارتی تنها درجه آزادی این المان‌ها درجه آزادی هشتم یعنی فشار دینامیکی است. در ادامه این المان‌ها با المان‌های پوشش کوپل می‌شوند.

جدول 1 پارامترهای مکانیکی توده سنگ (صانعی‌آرانی، 1391) و پوشش (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، 1384)

پوشش	توده سنگ	پارامتر
25	2/1	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
3	0/027	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
4/5	0/75	چسبندگی (مگاپاسکال)
45	35	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
0/25	0/3	ضریب پواسون
2400	2750	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
28/3	3	مقاومت فشاری تک‌محوره (مگاپاسکال)

<sup>1</sup> Acoustic medium

حل استفاده می‌شود. برای شبکه‌بندی سیال از خانواده المان‌های آکوستیک دوبعدی تحت عنوان AC2D4 بهره برده شد (شکل 2) (شهبازی و یکرنگ‌نیا، 1393).

اولین گام، شبیه‌سازی تنش‌های برجاست. تنش‌های برجای اختصاص داده شده به مدل باید از رابطه  $\sigma_v = \gamma h$  و  $\sigma_h = k_0 \gamma h$  (ضریب تنش در حالت سکون است) تبعیت کرده، به‌گونه‌ای که نشست سطح زمین قبل از حفر تونل باید نزدیک به صفر باشد. گام بعدی شبیه‌سازی عملیات حفاری<sup>2</sup> است. به این منظور نرم‌افزار پس از طی گام Geostatic وارد مرحله حفر می‌شود و قسمت‌هایی از مقطع که قرار است، تونل در آن احداث شود، از مدل حذف می‌گردد (حفاری به صورت تمام مقطع و به روش مکانیزه صورت می‌گیرد). در این مرحله آزادسازی تنش و جابجایی‌هایی در سنگ رخ می‌دهد. پس از این که مرحله حفاری به اتمام رسید و تعادل صحیح از تنش‌ها حاصل شد، شبیه‌سازی وارد عملیات پوشش‌دهی می‌شود. در این گام یک پوشش بتنی با مشخصات گفته شده در قبل دورتادور مقطع را فرا می‌گیرد. زمین اطراف تونل جابجایی خود را انجام داده و آزادسازی تنش به صورت کامل انجام می‌شود. برای ایجاد سطح تماس بین سنگ و بتن و تعیین خصوصیات مکانیکی سطح تماس، دو رفتار مماسی و نرمال بین فصل مشترک سنگ و بتن در نظر گرفته شد. گام نهایی، وارد کردن فشار استاتیکی و هیدرودینامیکی به پوشش اطراف تونل است. به‌طوری که تونل مورد نظر در ابتدا تحت فشار هیدرواستاتیکی سیال است و به‌طور ناگهانی دست‌خوش تغییرات فشار می‌شود. برای ایجاد فشار هیدرودینامیکی، حالت ساده زیر که در آن تغییرات فشار-زمان در اثر بسته شدن دریچه به‌وجود می‌آید، در نظر گرفته شد (شکل 3).

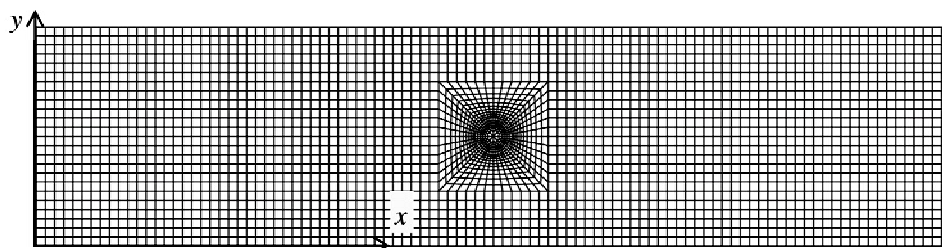
مسئله فوق با استفاده از نرم‌افزار HAMMER در حالت-های هیدرولیکی ماندگار و گذرا تحلیل شد (HAMMER, 2013). با تعریف خصوصیات مجرا، مخزن و دریچه از نوع تخلیه به اتمسفر می‌توان نتایج لازم را از این نرم‌افزار به دست آورد. در جدول 2 پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل در نرم‌افزار HAMMER آورده شده‌اند.

ایجاد این اندرکنش باید سطوحی از سازه و سیال که با هم در تماس هستند را به هم گره زد، یا اصطلاحاً tie کرد. گره زدن یک نوع قید مخصوص در نرم‌افزار ABAQUS است (باقری و کاظمی، 1393). به همین شکل، گره‌های خارجی پوشش با گره‌های سنگ اطراف مقطع حفاری با استفاده از ایجاد یک سطح تماس، با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند و برهم‌کنش سازه-سنگ نیز در مدل‌سازی منظور می‌شود.

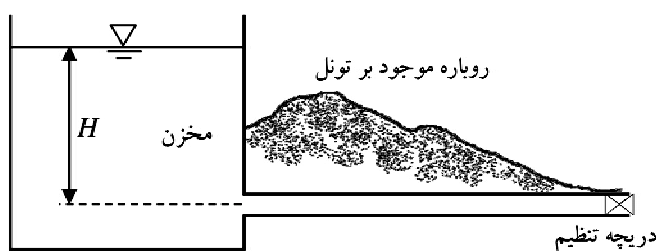
محیطی که در آن تونل حفر می‌شود، دارای تنش‌های برجا است. با تعریف این تنش‌ها در راستای افقی و عمودی و نیز اختصاص دادن بار وزن ناشی از توده سنگ به مدل، می‌توان به شرایط تعادلی بین تنش‌ها دست یافت. به‌طوری که نشست زمین قبل از عملیات حفارتقریباً صفر باشد. این اصل در موضوعات تونل و شبیه‌سازی آن‌ها با نرم‌افزار ABAQUS باید رعایت شود (شهبازی و یکرنگ‌نیا، 1393). بار وزن ناشی از پوشش نیز در مدل‌سازی منظور گردیده است. از آنجا که تغییرات فشار سیال در اثر عوامل گوناگون نظیر باز و بسته شدن دریچه‌ها به زمان وابسته است، این بارگذاری به‌صورت دینامیکی بر مدل اعمال می‌گردد. به‌نحوی که در زمان‌های مختلف فشارهای متفاوتی به پوشش وارد شود. بدین منظور با تعریف مقادیر فشار-زمان (با بهره‌گیری از تابع Amplitude برای اعمال بارهای متغیر با زمان) فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از سیال بر پوشش اعمال می‌گردد. این تغییر فشار-زمان به‌تمامی گره‌های محیط آکوستیک که برای شبیه‌سازی سیال از آن‌ها استفاده شد، اختصاص می‌یابد. برای شبکه‌بندی زمین از المان‌های خانواده کرنش مسطح با تابع درون‌یاب خطی استفاده شد. این نوع المان در نرم‌افزار ABAQUS تحت عنوان CPE4R شناخته می‌شود. شبکه‌بندی به‌گونه‌ای است که با نزدیک شدن به مقطع تونل، اندازه المان‌ها کوچک‌تر شده تا به جواب‌های صحیحی منجر شود (نرخ جهت‌گیری<sup>1</sup> برابر 4). برای المان‌بندی پوشش نیز از المان‌های خانواده تنش مسطح با تابع درون‌یاب خطی استفاده شد. این المان‌ها در ABAQUS با نام CPS4R شناخته می‌شوند. در المان‌های سنگ و پوشش از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته برای

<sup>2</sup> Excavation step

<sup>1</sup> Bias ratio



شکل 2 شبکه‌بندی مدل (شه‌بازی و یکرنگ‌نیا، 1393)



شکل 3 مدل ساده هیدرولیکی مخزن و دریچه

جدول 2 خصوصیات مجرای آب تحت فشار برای مدل‌سازی در HAMMER (Bae, 2004)

مشخصات تونل انتقال آب							
طول (کیلومتر)	قطر داخلی (متر)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	ضریب هیزن ویلیامز	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	سرعت موج فشاری (متر بر ثانیه)	هد مخزن در ورودی تونل (متر)	سرعت آب (متر بر ثانیه)
1 تا 10	3/6، 4 و 4/5	25	100	60	911	80	$\leq 6$

مدول بالک سیال ( $N/m^2$ ) و  $\rho$  دانسیته سیال ( $kg/m^3$ ) است.

فشار ایجاد شده در اثر بسته شدن دریچه در طول تونل، به صورت  $P = p(x,t)$  بیان می‌شود. مکان مورد بررسی در تونل به قسمت خروجی نزدیک است و طبقاً دارای روباره کمتر خواهد بود. در نهایت نتایج حاصل از مقادیر فشار-زمان در این نقطه از نرم‌افزار HAMMER استخراج شده و به‌عنوان بارگذاری هیدرودینامیکی وارد نرم‌افزار ABAQUS شد. بیشترین افزایش فشار در مدت زمان بسته شدن دریچه صورت می‌گیرد و پس از آن به‌دلیل وجود اصطکاک و افت‌ها، حالتی نوسانی میرا به خود می‌گیرد. بنابراین تغییرات فشار در بازه زمانی  $t = 0$  تا بسته شدن کامل دریچه، به‌عنوان بارگذاری هیدرودینامیکی در نظر گرفته شد.

لازم به‌ذکر است که سرعت آب با توجه به حداکثر سرعت مجاز توصیه شده در نشریه 309 در خصوص تونل‌های آبرو، 6 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مقدار دبی حداکثر با توجه به سرعت و سطح مقطع عبوری سیال 60 مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد. زمان بسته شدن دریچه با توجه به زمان بسته شدن دریچه در تونل‌های آبرو پروژه‌های سد و نیروگاه کارون 4، طرح توسعه مسجدسلیمان، سد کارون 1 و سد گتوند (بازه‌ای بین 14 تا 26 ثانیه) (اکبرزاده، 1382)، منظور شد. سرعت موج فشاری با توجه به خصوصیات مجرای انتقال آب با استفاده از رابطه (6) محاسبه شده است (HAMMER, 2013).

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{d}{Et} \right)}} \quad (6)$$

که در آن  $d$  قطر داخلی تونل (mm)،  $E$  مدول الاستیسیته پوشش بتنی ( $N/m^2$ )،  $t$  ضخامت پوشش بتنی (mm)،  $K$

### 3- تحلیل نتایج

#### 3-1- تغییرات فشار آب منفذی

بتن به‌طور کامل نفوذناپذیر نیست و به‌دلیل تشکیل خلل و فرج در هنگام سخت شدن، دارای نفوذپذیری هرچند اندک است. از این رو آب از این منافذ عبور کرده و به پشت آن راه پیدا می‌کند. اشلایس (1986) نفوذپذیری پوشش بتنی سالم در تونل‌های تحت‌فشار را به‌طور متوسط کوچکتر از  $10^{-8}$  متر بر ثانیه ارزیابی کرد. نفوذپذیری سنگ سالم (بدون درزه) در بازه‌ای بین 1 (نفوذپذیر کامل) تا  $10^{-12}$  متر بر ثانیه (نفوذناپذیر) تغییر می‌کند (Jaeger, et al., 2007). با در نظر گرفتن مقدار متوسط

$10^{-6}$  متر بر ثانیه برای سنگ و مقدار  $10^{-8}$  متر بر ثانیه برای پوشش بتنی، فشار آب در پشت پوشش و در تماس با سنگ به کمک رابطه تحلیلی اشلایس (Schleiss, 1986) محاسبه شد.

در شکل 4 مقایسه‌ای بین فشار آب منفذی ایجاد شده در مدل عددی با حل تحلیلی بوارد و پینتو (نقل از Zhou and Wu, 2015) ارائه شده است. دایره نشان داده شده، شکل شماتیکی از مقطع تونل به قطر 3/6 متر و طول 1 کیلومتر است و سرعت جریان آب درون این تونل 6 متر بر ثانیه منظور شده است. به‌عبارتی خط حفاری مبدا فاصله است. مطابق شکل، فشار آب منفذی در حل تحلیلی از نتایج حل عددی بیشتر است. عمل کرد اندرکنش هیدرومکانیکی به‌گونه‌ای است که آب تحت‌فشار باعث باز شدن بیشتر

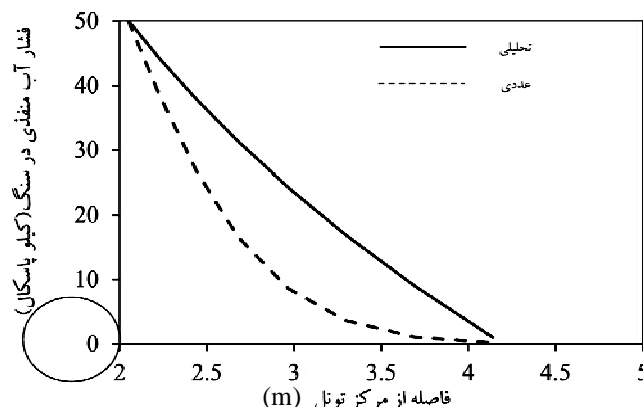
درزه‌ها در سنگ می‌شود. از این رو نفوذ آب از درزه بیشتر و نشت از آن افزایش می‌یابد. نفوذ آب بیشتر سبب می‌شود، فشار آب حفره‌ای درون درزه‌ها افزایش یابد. چون در حل تحلیلی بوارد و پینتو سنگ به‌صورت نیمه الاستیک فرض شده است، در اثر فشار آب، درزه‌ها باز شده و حالت برگشت‌پذیری ندارند. بدین ترتیب همیشه مقداری نشت از سنگ وجود دارد. قسمت انتهایی منحنی حل تحلیلی به صفر نزدیک شده است، ولی مقدار مطلق صفر را اختیار نمی‌کند و همواره مقداری نشت از تونل وجود خواهد داشت. با گذشت زمان درزه‌ها بازتر شده و به تبع آن الگوی توزیع فشار آب منفذی دست‌خوش تغییر خواهد شد. بدون در نظر گرفتن عامل زمان هر دو منحنی به یکدیگر همگرا می‌شوند. فاصله همگرایی، محدوده تحت تأثیر فشار آب تراوش کرده از پوشش است.

#### 3-2- اثر فشار در شرایط بهره‌برداری عادی

در این حالت تونل در شرایط پایدار به‌سر می‌برد و می‌توان از رابطه نیروژی برای محاسبه حداقل ارتفاع روباره لازم استفاده کرد (فیروزآبادی و همکاران، 1390).

$$l > \frac{\gamma_w H}{\gamma_r \cos \beta} \quad (7)$$

که در آن  $l$  حداقل میزان روباره مورد نیاز (متر)،  $H$  هد استاتیک آب داخل تونل (متر)،  $\beta$  زاویه شیب دره محل در محل خروجی تونل،  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب و  $\gamma_r$  وزن مخصوص سنگ است.



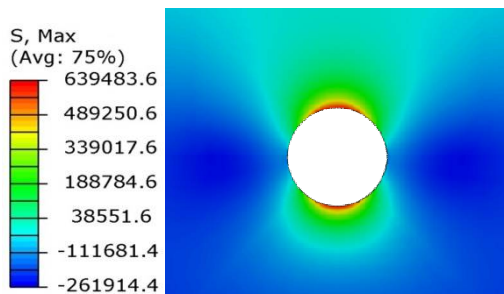
شکل 4 مقایسه بین فشار آب منفذی در سنگ با استفاده از نتایج عددی مطالعه حاضر و حل تحلیلی بوارد و پینتو

بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایطی که سنگ دارای درزه است، معیار نیروی فشار آب لازم را  $1/5$  برابر کمتر محاسبه می‌کند (فیروزآبادی و همکاران، 1390). در این شبیه‌سازی نشان داده شد که در صورتی که سنگ اطراف بدون درزه و کیفیت سنگ نیز مناسب و پوشش بتنی صرفاً برای ایجاد یک مقطع هیدرولیکی مناسب ایجاد گردد، این معیار فشار آب مورد نیاز را  $3/5$  برابر کمتر تخمین می‌زند. این مسأله باعث می‌شود از تمام ظرفیت تونل استفاده نشود.

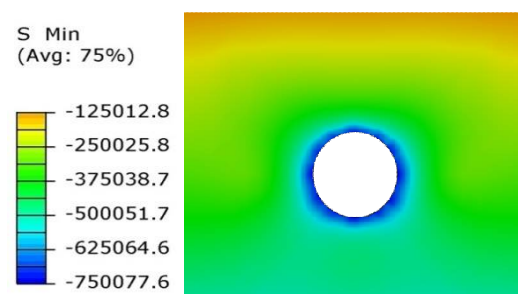
### 3-3- اعمال نوسانات فشار در حالت گذرا

برای ایجاد فشارهای هیدرودینامیکی فرض شده است، دریچه خروجی تونل در سه زمان مختلف  $t=14$  s (سریع)،  $t=18$  s (نیمه‌سریع) و  $t=26$  s (کند) به‌طور کامل بسته شود. این زمان‌ها براساس مدت زمان بسته شدن دریچه در تونل‌های آب‌بر پروژه‌های سد و نیروگاه کارون 4، طرح توسعه سد مسجد سلیمان، سد کارون 1 و سد گتوند منظور شدند (اکبرزاده، 1382). در هنگام بسته شدن دریچه، سرعت در پشت دریچه کم می‌شود و به تبع آن فشار رو به افزایش می‌رود. پس از بسته شدن کامل، مقدار فشار به حداکثر خود خواهد رسید. الگوی بسته شدن دریچه‌ها کاملاً خطی است. به این معنا که در زمان صفر (حالت پایدار) دریچه کاملاً باز است و نحوه بسته شدن آن تا پایان با آهنگ ثابت انجام می‌شود.

مقدار تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در المان‌های سنگ اطراف تونل در هنگام وارد شدن فشار داخلی در شرایط استاتیکی استخراج گردید (شکل‌های 5- الف و ب). با توجه به قرارگیری این تنش‌ها در سه ناحیه مختلف، شکست خوردگی المان‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از معیار شکست موهر- کولمب برای بررسی شکست و بروز ترک در سنگ، تنش‌های اصلی بزرگ و کوچک با توجه به پارامترهای مکانیکی سنگ ترسیم گردید. از آنجایی که مسأله کاملاً متقارن است، فقط المان‌های نصف مقطع مورد بررسی قرار گرفت. در معیار شکست موهر-کولمب، لازم نیست تنش‌های اصلی به مقدار حداکثر خود برسند، بلکه کافی است ترکیب آن‌ها به یک مقدار حدی برسد تا باعث بروز شکست در سنگ گردد. با توجه به فشار وارده از جانب آب به پوشش و وارد شدن این فشار به سنگ، تنش‌های کششی در اطراف تونل ظاهر می‌شوند. همچنین الگوی توزیع تنش در اطراف تونل دچار تغییر می‌شود. با ترسیم مقادیر تنش اصلی بیشینه در برابر تنش اصلی کمینه و مقایسه آن با معیار شکست موهر-کولمب در شکل 6 مشاهده می‌شود که شکست در المان‌های اطراف تونل رخ نمی‌دهد. مطابق با شکل 6 یک المان که با پیکان نشان داده شده است، در شرایط حدی به‌سر می‌برد. به این معنا که اگر فشار آب از این مقدار بیشتر شود، المان مورد نظر دچار شکست هیدرولیکی خواهد شد. بدین ترتیب از تمام ظرفیت تونل استفاده شده است. فیروزآبادی و همکاران (1390)، کارایی معیار نیروی را در تونل تحت فشار دارای درزه



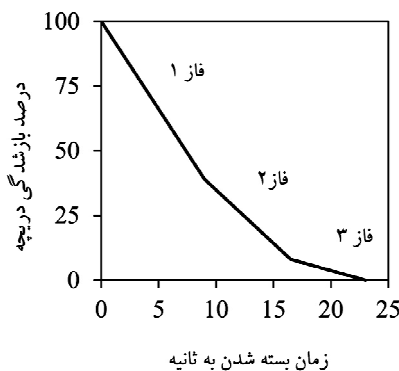
(ب)



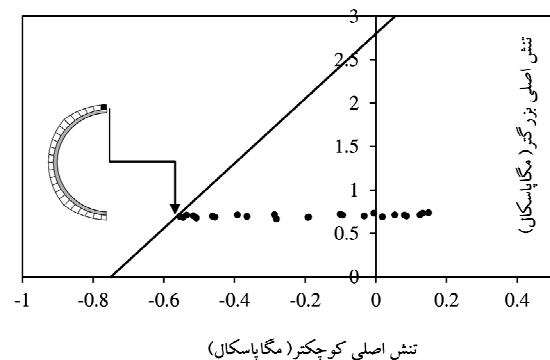
(الف)

شکل 5 منحنی‌های هم‌تراز (الف)-تنش اصلی کمینه و (ب)-تنش اصلی بیشینه در سنگ محصور کننده تونل به قطر  $3/6$  متر در حالت اعمال فشار استاتیکی





شکل 7 نتایج تحلیل هیدرولیکی دریچه (الگوی بسته شدن دریچه تونل آب بر سد و نیروگاه کارون 4)



شکل 6 مقادیر تنش‌های اصلی در المان‌های اطراف پوشش و قرار گرفتن آن‌ها در زیر خط شکست برای تونل به قطر 3/6 متر

به این ترتیب با استفاده از نرم‌افزار HAMMER، نمونه‌ای از پوش منحنی‌های فشار حداکثر - زمان در سه زمان مختلف بسته‌شدن دریچه (سریع، نیمه‌سریع و کند) برای تونل به قطر 3/6 متر در شکل‌های 8 نشان داده شده است. با افزایش مدت زمان بسته شدن دریچه از مقدار بیشینه فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده، کاسته می‌شود. در ثانیه‌های اول، به دلیل این‌که انرژی جنبشی با نرخ سریع‌تری به انرژی فشاری تبدیل می‌شود، منحنی فشار - زمان دارای شیب تندتری است. در ثانیه‌های انتهایی بسته‌شدن به دلیل این‌که بیشتر آب موجود در پشت دریچه به حالت سکون رسیده است، بسته‌شدن بیشتر دریچه و مسدود شدن آن اثر اندکی بر روی انرژی فشاری می‌گذارد.

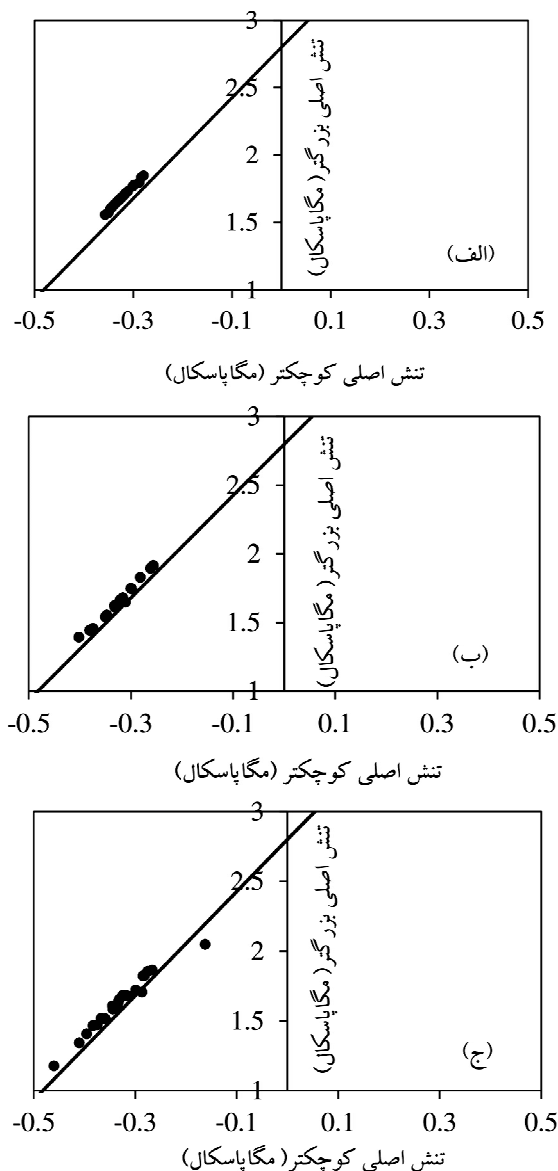
با انتقال بارگذاری‌های فوق به نرم‌افزار ABAQUS و با بهره‌بردن از منحنی شکست موهر-کولمب نتایج تنش در المان‌های اطراف پوشش برای زمان‌های مختلف بسته‌شدن دریچه، در شکل‌های 9 نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است، تمامی المان‌ها در اطراف پوشش در بالای خط قرار دارند. این موضوع نشان‌دهنده این است که این المان‌ها دچار شکستگی شده‌اند. زمانی که دریچه در مدت زمان 14 ثانیه بسته می‌شود، المان‌ها تحت تأثیر این فشار ناگهانی قرار می‌گیرند و به سرعت تمامی این فشار را جذب می‌کنند. به طوری که گستره تنش در آن پایین است. با افزایش زمان بسته‌شدن دریچه به 18 و 26 ثانیه، گستره توزیع تنش کمی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که المان‌ها تا حدودی فرصت تطبیق با فشار موجود را پیدا می‌کنند.

بسته شدن دریچه به صورت کاملاً یکنواخت و با آهنگ ثابت، یک حالت بحرانی است و هنگامی که طرح با شرایط ویژه روبرو است، اتفاق می‌افتد. اگر دریچه در چند مرحله و با آهنگ‌های مختلف بسته شود، از مقدار فشارهای گذرا ایجاد شده کاسته می‌شود و خسارات کمتری را به سازه وارد خواهد ساخت. به منظور بررسی این موضوع نیز فشار - های گذرا حاصل از بسته‌شدن دریچه تونل آب بر بر اساس اطلاعات ارائه شده در پروژه سد و نیروگاه کارون 4 (شکل 7) مدنظر قرار گرفت.

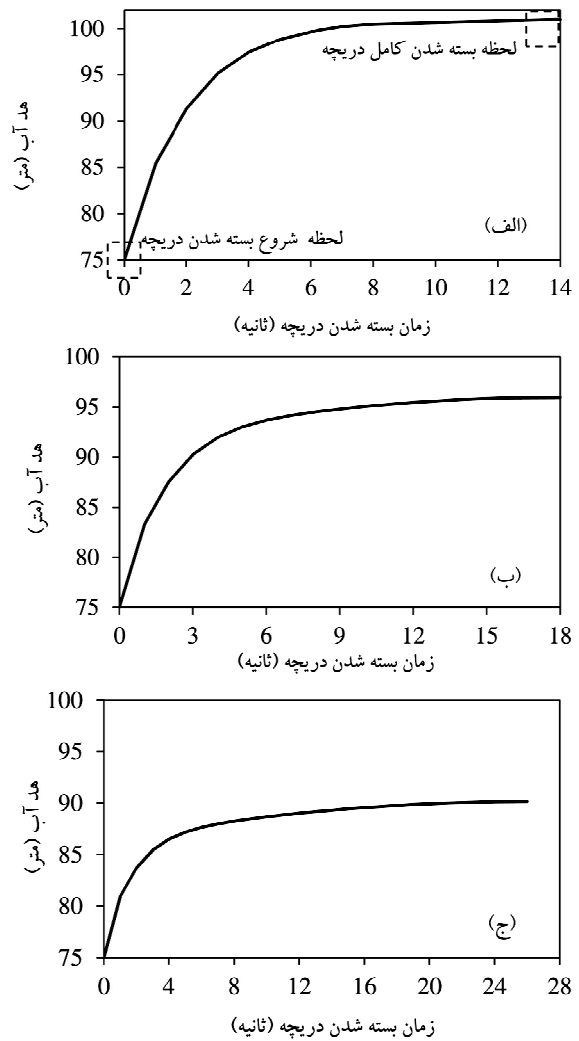
با توجه به شیب منحنی، بسته‌شدن در سه فاز سریع، نیمه‌سریع و کند صورت می‌گیرد. به این ترتیب در منحنی فشار - زمان نیز چهار فاز مختلف به وجود می‌آید. در فاز اول منحنی به حداکثر فشار می‌رسد. در ورود به فاز دوم، افت هد و در ادامه آن نوسانات فشار شکل می‌گیرند. با ورود به فاز سوم مجدداً افت هد رخ داده و تا بسته شدن کامل دریچه این نوسانات ادامه پیدا می‌کنند. در فاز چهارم دریچه کاملاً بسته شده است، اما همچنان نوسانات فشاری ادامه دارد. این تغییرات فشار با گذشت زمان به دلیل اصطکاک میرا شده و با گذشت زمان‌های طولانی پشت دریچه فشار ثابتی به وجود می‌آید.

نوسانات فشار بعد از بسته شدن کامل دریچه به عنوان بارگذاری هیدرودینامیکی در محاسبات لحاظ نگردید و تنها قسمتی از منحنی فشار - زمان که دارای بیشینه فشار ناشی از بسته شدن کامل دریچه است، در شبیه‌سازی منظور شده است. زیرا سنگ در این حالت متحمل بیشترین نیرو در اثر موج فشاری آب خواهد بود و احتمال شکست هیدرولیکی افزایش خواهد یافت.

به‌منظور جلوگیری از بروز پدیده شکست هیدرولیکی، بحرانی‌ترین حالت بسته شدن دریچه یعنی  $t = 14$  s در نظر گرفته شد. با افزایش روباره به میزان 13، 26، 53 و 93 درصد هد استاتیکی، با ثابت بودن سایر شرایط، شکست المان‌های اطراف پوشش مورد بررسی قرار گرفت. هدف آن بود که با افزایش روباره در هیچ‌کدام از المان‌های اطراف پوشش شکستی رخ ندهد. به‌عبارت دیگر تمامی المان‌ها باید در زیر خط معیار موهر-کولمب قرار گیرند.



شکل 9 قرار گرفتن تمامی المان‌ها در بالای خط شکست. با بسته شدن دریچه در الف) 14 ثانیه، ب) 18 ثانیه و ج) 26 ثانیه

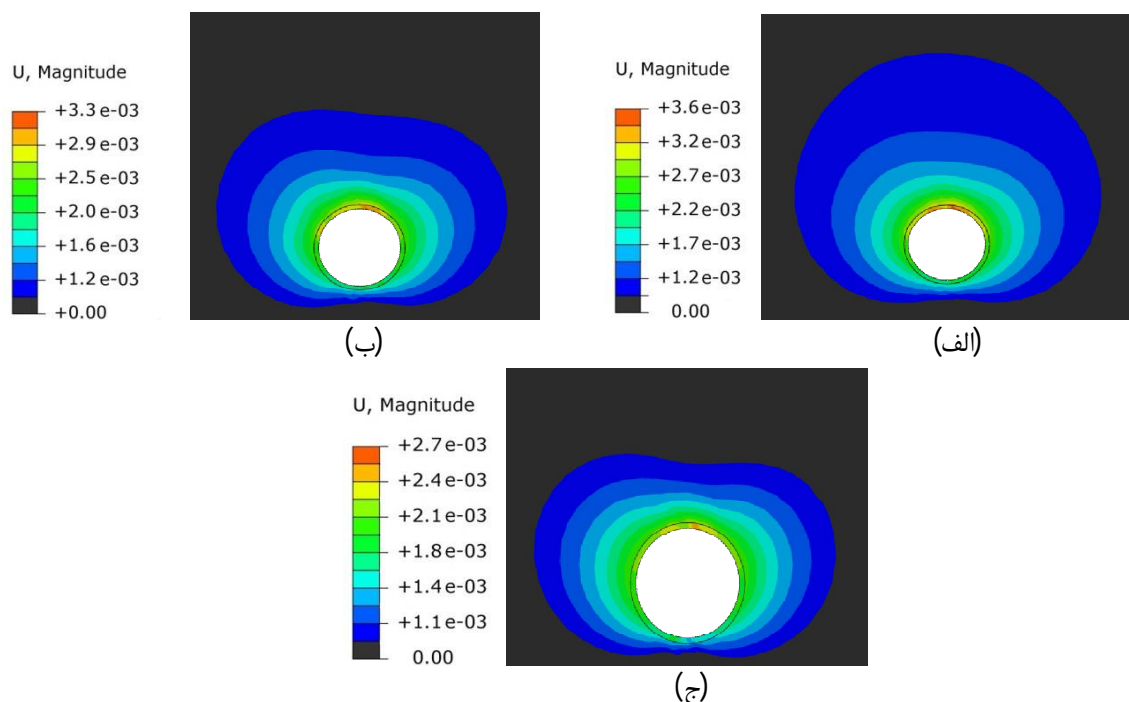


شکل 8 تغییرات فشار - زمان پشت دریچه برای تونل به قطر 3/6 متر، به ازای بسته شدن دریچه در الف) 14 ثانیه، ب) 18 ثانیه و ج) 26 ثانیه

در شکل 9- ج دو المان هنوز به ترک‌خوردگی نرسیده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش هرچه بیشتر زمان بسته شدن دریچه، احتمال شکست خوردگی و بروز ترک در اطراف پوشش کاهش می‌یابد. این تغییر فشار، باعث جابجایی‌هایی در المان‌های اطراف تونل تحت فشار می‌شود. در شکل 10 نیز منحنی‌های هم‌تراز جابجایی در سنگ نشان داده شده است.

### 3-4- تأثیر افزایش روباره بر جلوگیری از بروز شکست هیدرولیکی در سنگ

برای بررسی تأثیر میزان روباره موجود بر روی تونل،



شکل 10 منحنی‌های هم‌تراز جابجایی در سنگ در لحظه (الف) - 14، (ب) - 18 و (ج) - 26 ثانیه برای تونل به قطر  $3/6$  متر و سرعت جریان درون تونل 6 متر بر ثانیه

از المان‌ها ایجاد شده است؛ ولی هنوز شکست در تعدادی از المان‌ها ممکن است. با رسیدن ارتفاع روباره به  $0.93H$ ، تمامی المان‌ها در زیر خط موهر-کولمب قرار می‌گیرند و احتمال بروز شکست هیدرولیکی در المان‌های اطراف پوشش کم می‌شود. به این ترتیب با سالم ماندن این ناحیه از تونل (المان‌های سنگ اطراف پوشش) سایر مناطق اطراف تونل نیز، دچار پدیده شکست هیدرولیکی نمی‌شوند.

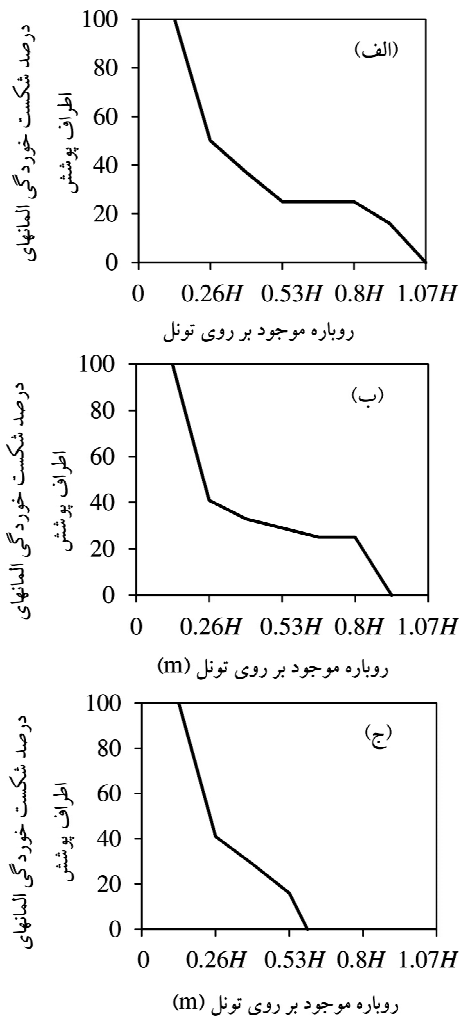
### 3-5- بحث روی نتایج

برای بررسی بهتر تأثیر افزایش روباره بر شکست هیدرولیکی، شکل 12، ارتباط میزان روباره و درصد شکست خوردگی در المان‌های اطراف پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از منحنی‌های درصد شکستگی- روباره، در سه حالت مختلف بسته شدن دریچه (سریع، نیمه‌سریع و کند)، لزوماً با افزایش روباره نمی‌توان انتظار داشت که وقوع شکست در المان‌های سنگ اطراف به صورت خطی کاهش یابد. این موضوع به این دلیل است که فشار آب در درون تونل با گذشت زمان

در صورتی که تنها یکی از المان‌ها دچار ترک خوردگی شده باشند، همچنان شکست هیدرولیکی یک تهدید جدی برای تونل محسوب می‌شود. زیرا نشت از پوشش بتنی باعث ورود آب پرفشار به سنگ شده و ترک‌ها را بازتر کرده و باعث ناپایداری می‌شود. از این رو سنگ اطراف پوشش باید بدون ترک خوردگی باشد.

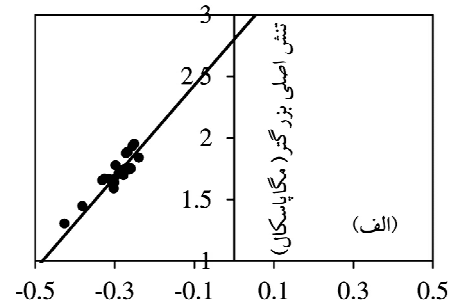
در شکل‌های (11-الف تا 11-د) شکست المان‌های اطراف پوشش با تغییر میزان روباره تونل، بررسی شده است. با افزایش روباره به میزان  $0.13H$  (که  $H$  هد استاتیکی آب در مقطع مورد بررسی در تونل است)، تعداد المان‌های زیادی زیر خط موهر-کولمب قرار می‌گیرند و دچار شکست نمی‌شوند. دلیل این موضوع به هم خوردن الگوی توزیع تنش ناشی از فشار سیال و تأثیر گذاشتن آن بر المان‌های اطراف پوشش است، به نحوی که تنش‌های موجود در المان را از حالت حدی خارج کرده و به زیر خط معیار شکست موهر-کولمب می‌رساند. با افزایش روباره به  $0.26H$ ، همان‌طور که انتظار می‌رود، احتمال شکست هیدرولیکی با حرکت المان‌ها به زیر خط کاهش می‌یابد. با رساندن این روباره به  $0.53H$  حاشیه ایمنی برای بسیاری

دچار تغییر می‌شود.

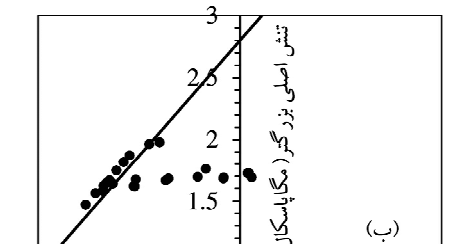


شکل 12 تغییرات شکست هیدرولیکی المان‌ها در اثر افزایش روباره برای زمان بسته شدن دریاچه الف) 14 ثانیه، ب) 18 ثانیه و ج) 26 ثانیه

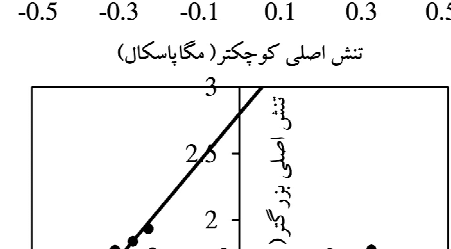
این تغییر فشار باعث به وجود آمدن تنش‌های مختلف در جداره تونل، در زمان‌های بین باز و بسته بودن دریاچه می‌شود. از طرفی محیط اطراف تونل به دلیل وجود روباره دارای تنش‌های برجا است. تنش‌های حاصل از فشار سیال به المان‌های سنگ اطراف پوشش و تنش‌های ناشی از روباره موجود در آن المان‌ها، با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اگر این ترکیب باعث شود، تنش‌های اصلی در المان به حد بحرانی برسد، المان دچار شکست خواهد شد. در غیر این صورت المان مذکور سالم باقی خواهد ماند. بروز شکست هیدرولیکی در اطراف پوشش منجر به یک حالت حدی در تنش‌های اصلی المان می‌شود. گاهی با زیاد کردن روباره و



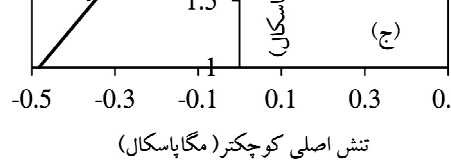
شکل 11 تنش‌های اصلی در المان‌های اطراف پوشش با افزایش روباره به میزان الف)  $0.13H$ ، ب)  $0.26H$ ، ج)  $0.53H$  و د)  $0.93H$  (زمان بسته شدن دریاچه در هر چهار حالت 14 ثانیه و هد استاتیکی آب 80 متر بوده است)



شکل 11 تنش‌های اصلی در المان‌های اطراف پوشش با افزایش روباره به میزان الف)  $0.13H$ ، ب)  $0.26H$ ، ج)  $0.53H$  و د)  $0.93H$  (زمان بسته شدن دریاچه در هر چهار حالت 14 ثانیه و هد استاتیکی آب 80 متر بوده است)



شکل 11 تنش‌های اصلی در المان‌های اطراف پوشش با افزایش روباره به میزان الف)  $0.13H$ ، ب)  $0.26H$ ، ج)  $0.53H$  و د)  $0.93H$  (زمان بسته شدن دریاچه در هر چهار حالت 14 ثانیه و هد استاتیکی آب 80 متر بوده است)



شکل 11 تنش‌های اصلی در المان‌های اطراف پوشش با افزایش روباره به میزان الف)  $0.13H$ ، ب)  $0.26H$ ، ج)  $0.53H$  و د)  $0.93H$  (زمان بسته شدن دریاچه در هر چهار حالت 14 ثانیه و هد استاتیکی آب 80 متر بوده است)

محسوب می‌شود. افزایش زمان بسته‌شدن دریچه باعث می‌شود حداکثر فشار هیدرودینامیکی به‌وجود آمده در پشت دریچه کاهش یابد. با بسته‌شدن سریع دریچه، تمامی المان‌های سنگ اطراف تونل دچار ترک‌خوردگی شد. نتایج بررسی تأثیر روباره بر روی تونل نشان داد که همواره با افزودن روباره بر روی تونل، بروز شکست در المان‌های اطراف کاهش نمی‌یابد. با افزایش روباره المان‌های کناری جداره سریعاً تحت تأثیر این افزایش ارتفاع روباره قرار گرفته و ترکیب تنش‌های اصلی در آن از حالت بحرانی شکست خارج شده و با توجه به معیار شکست موهر-کولمب در زیر خط شکست قرار می‌گیرند. با افزایش زمان بسته‌شدن دریچه به دلیل کاهش فشارهای هیدرودینامیکی داخل تونل به ارتفاع روباره کمتری برای خارج نمودن المان‌ها از حالت بحرانی شکست لازم است. ولی آهنگ این کاهش بسته به مختصات قرارگیری المان‌ها متفاوت خواهد بود. برای کنترل این پدیده مخرب در سنگ ضعیف می‌توان با ایجاد مناطق تزریقی با بتن در اطراف تونل، علاوه بر کاهش نشت، همبستگی و یکپارچگی سنگ را افزایش داد و فشار هیدرولیکی آب وارده به سنگ را تا حد قابل قبولی کاهش داد.

#### 5- فهرست علائم

<i>B</i>	بردار نیروهای کالبدی
<i>C</i>	ماتریس میرایی
<i>d</i>	قطر داخلی تونل
<i>E</i>	مدول الاستیسیته پوشش بتنی
$\{f\}$	نیروهای اعمال شده بر روی پوشش
<i>H</i>	هد استاتیک آب داخل تونل
<i>K</i>	مدول بالک سیال
<i>K</i>	ماتریس سختی
<i>l</i>	حداقل میزان روباره مورد نیاز
<i>M</i>	ماتریس جرم
<i>n</i>	بردار یکه عمود بر سطح مشترک
<i>p</i>	فشار هیدرودینامیکی سیال داخل تونل
$\{p\}$	فشار هیدرودینامیکی درون تونل
$P_o$	فشار هیدرودینامیکی المان‌های سیال داخل تونل
$P = p(x,t)$	فشار ایجاد شده در اثر بسته شدن دریچه در طول تونل
$[Q]$	ماتریس کوپله

افزایش تنش‌های برجا و ترکیب آن با تنش‌های ناشی از بسته شدن دریچه، المان‌ها سریع‌تر از حالت حدی شکست خارج می‌شوند و گاهی نیز این روند به آهستگی انجام می‌گیرد. افزایش روباره در ابتدا باعث می‌شود که تنش در بسیاری از المان‌ها از حالت بحرانی شکست خارج شود، ولی همچنان تعدادی از المان‌ها دچار شکست می‌شوند. برای این‌که این المان‌ها نیز از وضعیت شکست‌خوردگی خارج شوند، روباره افزایش پیدا می‌کند. افزایش روباره همواره باعث نمی‌شود که تمامی المان‌ها به‌طور همزمان در زیر خط شکست قرار گیرند، زیرا مقدار روباره در هر المان اطراف تونل تنش متفاوتی را ایجاد خواهد کرد. به‌طور مثال المان‌های سنگ طرفین تونل با افزایش روباره به دلیل مکانیزم تنش در اطراف تونل، دچار تمرکز تنش شده و سریع‌تر از سایر المان‌ها افزایش روباره را تجربه می‌کنند. بدین ترتیب زودتر از سایر المان‌ها از حالت حدی شکست خارج شده و در حاشیه ایمنی قرار می‌گیرند.

#### 4- نتیجه‌گیری

شکست هیدرولیکی در تونل‌های تحت فشار از جهات مختلفی مورد توجه قرار گرفته است و راه‌کارهای گوناگونی برای جلوگیری از این پدیده مخرب در تونل‌های تحت فشار پیشنهاد شده است. یکی از این راه‌کارها افزایش روباره در منطقه حفاری است. در مطالعه حاضر، با بهره‌گیری از روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن اندرکنش بین آب و سازه، تونل تحت فشاری با شرایط هیدرولیکی، سازه‌ای و ژئوتکنیکی مطابق با شرایط واقعی مدل‌سازی شد. نتایج هیدرولیکی در دو وضعیت هیدرولیکی پایدار و گذرا در نرم‌افزار HAMMER مورد تحلیل قرار گرفت و خروجی‌های این نرم‌افزار شامل تغییرات فشار- زمان برای تحلیل تنش به نرم‌افزار ABAQUS انتقال داده شد.

تحلیل هیدرولیکی الگوی بسته شدن دریچه و فشارهای گذرای ایجاد شده ناشی از این بسته شدن و مقایسه آن با نمودارهای فشار- زمان حاصل از نرم‌افزار HAMMER بیان‌گر این موضوع است که الگوی بسته‌شدن دریچه در مدل‌سازی انجام شده یک حالت بحرانی برای طرح

- کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- ABAQUS, *Theory guide and manual*, Release 12.6 ABAQUS, Inc. 2012.
- Bae, G.J. (2004). "Evaluation of interfacial properties between rock mass and shotcrete", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 106-112.
- Bobet, A. and Nam, S.W. (2007). "Stresses around pressure tunnels with semi-permeable liner", *Journal of Rock Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 287-315.
- Fernandez, G. and Alvarez, T. (1994). "Seepage induced effective stresses and water pressure around pressure tunnels", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 108-128.
- Hachem, F. and Schleiss, A. (2009). "The design of steel-lined pressure tunnels and shafts", *International Journal on Hydropower and Dams*, Vol. 16, No. 3, pp. 142-151.
- HAMMER, *User guide*, Release 8 Bentley HAMMER Inc., 2013.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4<sup>th</sup> Edition, Blackwell Publishing, USA.
- Olumide, B.A. and Marence, M. (2012). "Finite element model for optimum design of plain concrete pressure tunnels under high internal pressure", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 676-683.
- Schleiss, A.J. (1986). "Design of pervious pressure tunnels", *International Journal of Water Power and Dam Construction*, Vol. 38, No. 5, pp. 21-26.
- Simanjuntak, T.D.Y.F., Schleiss, A.J., and Mynett, A.E. (2014). "Pressure tunnels in non-uniform in situ stress conditions", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, No. 42, pp. 227-236.
- Zhou, Y., Su, K. and Wu, H. (2015). "Hydro-mechanical interaction analysis of high pressure hydraulic tunnel", *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, No. 47, pp. 28-34.

$R_r$	بردار نیروهای خارجی وارد بر سنگ
$t$	ضخامت پوشش بتنی
$u_r$	بردار جابجایی المان‌های سنگ
$\dot{u}_r$	بردار سرعت المان‌های سنگ
$\ddot{u}_s$	شتاب پوشش
$\ddot{u}_r$	بردار شتاب المان‌های سنگ
$v$	میدان سرعت در سیال
$\beta$	زاویه شیب دره محل در محل خروجی تونل
$\gamma_w$	وزن مخصوص آب
$\gamma_r$	وزن مخصوص سنگ
$\mu$	لزجت سیال
$\rho$	دانسیته سیال

## 5- منابع

- اکبرزاده، پ. (1382). "تحلیل ضربه قوچ در نیروگاه‌های آبی ایران به کمک برنامه‌نویسی متلب". کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی ایران، تهران.
- باقری، م. و کاظمی، م. (1393). مدل‌سازی عددی سدهای بتنی وزرنی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، انتشارات سپیما دانش، تهران.
- راهنمای طراحی سازه‌های تونل‌های آب‌بر، نشریه 309، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، 1384.
- شهبازی، ر. و یکرنگ‌نیا، م. (1393). راهنمای کاربردی آباکوس به همراه مسائل مهندسی عمران، انتشارات علم عمران، 1393.
- صانعی‌آرانی، م. (1391). "بررسی عوامل منجر به ترک خوردگی سگمنت تونل انتقال آب گلاب با نگرش ویژه به تنش‌های برجا"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- فیروزآبادی، س.ص.، یزدانی، م. و شریف‌زاده، م. (1390). "مطالعه عددی پدیده جکینگ هیدرولیکی در تونل‌های تحت فشار با استفاده از روش عددی المان‌های مجزا"، ششمین