

طراحی پوشش سگمندی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به تاثیر مفاصل قطعات پوشش

حسن بخشنده امنیه^{۱*}؛ سعید طایبی سمیرمی^۲؛ مرتضی رحیمی دیزجی^۳

۱- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رشته مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشکده مهندسی؛ دانشگاه کاشان

۳- دانشجوی دکترای تخصصی؛ رشته مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ کارشناس شرکت مهندسی سپاسد

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی	چکیده
تونل بلند انتقال آب پوشش سگمندی مفاصل پوشش نیروهای داخلی	مفاصل بین قطعات پوشش می‌توانند مقدار مشخصی از گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی را تحمل کنند. گزاره‌ی نیرو-جابجایی نیز در محدوده مشخصی از بار اعمالی می‌تواند تقریباً خطی در نظر گرفته شود. در تحلیل سازه‌ای پوشش سگمندی، مفاصل می‌توانند به صورت لولاهای الاستیک مدل شوند و مشخصات سختی آن‌ها توسط صلبیت مفاصل بیان شود. این امر باعث می‌شود که گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش یابد و با کاهش نیروهای داخلی وارده بر پوشش می‌توان از پوششی با ضخامت کمتر استفاده نمود. در این مقاله نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمندی باتوجه به اثر مفاصل در حالت‌های نسبت تنش افقی به قائم کوچک‌تر و بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شده است. روش تحلیلی برای ساختار مفاصل با تحلیل بر روی نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب مقاوم توده‌سنگ، تاثیر سختی مفاصل، نحوه توزیع مفاصل و تعداد مفاصل انجام و گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل به علت نیروهای داخلی وارد بر پوشش محاسبه شده است. با توجه به نمودار اثر متقابل نیروی محوری و گشتاور خمشی پوشش، پوشش سگمندی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به روش‌های تحلیلی و عددی برآورد شده است.

۱- مقدمه

و انیشتین (*Peck and Einstein*) به ترتیب در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۹ ارایه و تکمیل شده است، طراحی می‌شود. نسبت انعطاف‌پذیری ارتباط توده‌سنگ اطراف تونل و ساختار پوشش را بیان می‌کند. افزایش نسبت انعطاف‌پذیری نشان می‌دهد که گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش یافته است. این نسبت به صورت گزاره‌ی (۱) است [1] و [2].

یکی از مهم‌ترین عامل‌های طراحی پوشش تونل با قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمندی)، تاثیر مفاصل سگمندی روی گشتاور خمشی است. این امر ناشی از تفاوت سختی مفاصل با سختی سگمندی اصلی است. تحقیقات نشان می‌دهد که مفاصل سگمندی علاوه بر سختی کمتر، بیش‌ترین تغییر شکل را نسبت به بخش اصلی متحمل می‌شوند؛ به همین دلیل مفاصل سگمندی بحرانی‌ترین قسمت پوشش را تشکیل می‌دهند. معمولاً پوشش تونل با استفاده از پارامتری که نسبت انعطاف‌پذیری (خمشی) نامیده می‌شود و توسط پیک

$$F = \frac{E_s}{6EI} \frac{(1+\nu_s)}{(1-\nu^2)R^3} \quad (1)$$

* اصفهان؛ کاشان؛ کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی؛ دانشگاه کاشان؛ گروه مهندسی معدن؛ کدپستی: ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷؛ شماره تلفن: ۰۳۶۱-۵۹۱۲۱۳۱؛ داخلی: ۲۱۳۱؛ دورنگار: ۰۳۶۱-۵۵۱۳۱۱۰؛ رایانامه: bakhshandeh@kashanu.ac.ir

الف- سختی پیچشی پوشش حلقوی یکپارچه در سراسر پوشش، یکنواخت فرض شده و کاهش سختی به سبب حضور مفاصل نادیده گرفته می‌شود.

ب- کاهش سختی به سبب وجود مفاصل با اعمال ضریب کاهش η به صورت سختی پوشش یکپارچه محاسبه می‌شود.

پ- پوشش حلقوی یکپارچه به صورت پوشش مفصل شده ساده‌سازی می‌شود. صلبیت اتصال‌ها نادیده انگاشته و مفاصل به صورت لولاهای کامل در نظر گرفته می‌شوند.

ت- پوشش حلقوی یکپارچه به صورت پوشش مفصل شده ساده‌سازی می‌شود؛ اما صلبیت اتصالات در نظر گرفته و مفاصل به صورت لولاهای الاستیک با صلبیت ثابت مدل می‌شوند.

در این مقاله، ابتدا نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمنتی با در نظر گرفتن اثر مفاصل محاسبه شده است. سپس روش تحلیلی پیشنهادی برای ساختار مفاصل با تحلیل بر روی نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب واکنش توده‌سنگ، تأثیر سختی مفاصل، نحوه توزیع مفاصل و تعداد مفاصل بررسی شده است. در این بررسی گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل به علت نیروهای داخلی وارد بر پوشش محاسبه شده و در ادامه نیز با توجه به نمودار اثر متقابل نیروی محوری و گشتاور خمشی پوشش، ضخامت پوشش سگمنتی بهینه برای تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به روش‌های تحلیلی و عددی تعیین شده است.

۲- نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمنتی با

در نظر گرفتن اثر سختی مفاصل

مفاصل بین قطعات پوشش می‌توانند مقدار مشخصی از گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی را تحمل کنند و گزاره‌ی نیرو-جابجایی در محدوده‌ی مشخصی از بار اعمالی می‌تواند تقریباً خطی در نظر گرفته شود. در تحلیل سازه‌ای این مفاصل می‌تواند به صورت لولاهای الاستیک مدل شوند و مشخصات سختی آن‌ها با صلبیت محوری (K_{θ}) ، برشی (K_s) و پیچشی (K_{θ}) بیان شود [۱۰]. توزیع فشار وارده بر پوشش سگمنتی را می‌توان مطابق شکل ۱ در

وود (*Wood*) در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد کرد که لختی دورانی موثر پوشش، باید برای ساختار مفاصل به صورت گزاره‌ی (۲) اصلاح شود [3].

$$I = \left[\frac{4}{N'} \right]^2 I_o + I_j \quad (2)$$

در سال ۲۰۰۱، لی و جی (*Lee & Ge*) ارتباط تحلیلی ضریب کاهش لختی دورانی و بیش‌ترین جابجایی افقی برای پوشش حلقوی یکپارچه را به صورت گزاره‌ی (۳) پیشنهاد دادند [4]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \Delta_h} \quad \Delta_h = \frac{3EI}{RK_{\theta}} \sum_{i=1}^{N'} \cos \varphi_i \cos 2\varphi_i \quad (3)$$

لی و همکاران (*Lee, et al.*) در سال ۲۰۰۱ پوشش حلقوی سگمنتی را به صورت پوشش حلقوی مفصل شده ساده‌سازی و با در نظر گرفتن صلبیت اتصالات، مفاصل را به صورت لولاهای الاستیک با صلبیت ثابت مدل کردند [5]. کویاما (*Koyama*) در سال ۲۰۰۳، نتایج طراحی مهندسان عمران ژاپن را این‌گونه توصیف کرد که در طراحی پوشش با توجه به مفاصل پوشش، بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش، ۶۰ تا ۸۰ درصد بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش سگمنتی بدون مفاصل است؛ بنابراین با اعمال ضریب کاهش، کاهش سختی به دلیل حضور مفاصل به صورت سختی پوشش یکپارچه در نظر گرفته می‌شود [6]. در سال ۲۰۰۶، لو و همکارانش (*Lu, et al.*) رفتار پوشش سگمنتی یکپارچه را مورد ارزیابی قرار دادند که در این آزمایش مفاصل پوشش در نظر گرفته نشدند. به همین منظور زی‌چون و همکارانش (*Xiaochun, et al.*) در همان سال مطالعات عددی خود را در زمینه‌ی تأثیر بار وارده بر مفاصل پوشش سگمنتی با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار *PLAXIS* انجام دادند [7] و [8]. تیچاوراسینسکن و چب (*Teachavorasinskun & Chub*) در سال ۲۰۱۰ با آزمایش بر روی ۴ مدل سگمنت (بدون مفصل و با مفاصل به ضخامت‌های متفاوت) به این نتیجه رسیدند که ضریب کاهش گشتاور خمشی به شدت به مقاومت مفاصل سگمنت بستگی دارد. ضریب کاهش گشتاور خمشی با کاهش مقاومت مفاصل سگمنت، کاهش می‌یابد [9].

در طراحی سازه‌ای پوشش سگمنتی، روش‌های تعیین نیروهای وارده بر پوشش به صورت زیر است [5] و [۱۰]:

فشارهای زمین دربرگیرنده برای موارد شش‌گانه بارگذاری
($j=1,2,\dots,6$) از جمع آثار بارگذاری تشریح شده در شکل ۱
و گزاره‌ی (۸) بدست می‌آید [5]:

$$M_p = \sum_{j=1}^6 M_{pj} \quad N_p = \sum_{j=1}^6 N_{pj} \quad (8)$$

نیروهای داخلی کلی پوشش از گزاره‌ی (۹) بدست می‌آید
[5]:

$$M = \bar{M}_1 x_1 + \bar{M}_2 x_2 + M_p \quad (9)$$

$$N = \bar{N}_1 x_1 + \bar{N}_2 x_2 + N_p$$

جابجایی قائم در سقف تونل و جابجایی افقی که در دیواره
تونل ایجاد می‌شود به صورت گزاره‌های (۱۰) و (۱۱) تعیین
می‌شود [5]:

$$\Delta_v = \int \frac{\bar{M}_{T1} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_\theta^{(i)}} \bar{M}_{T1}^{(i)} \bar{M}^{(i)} \quad (10)$$

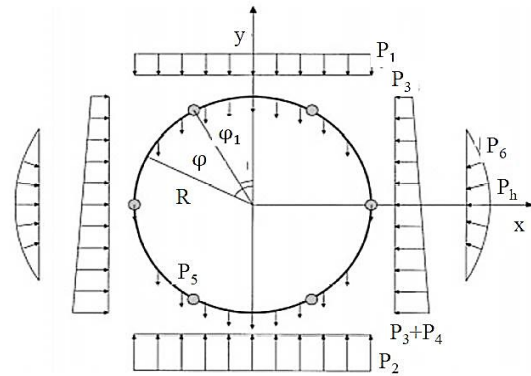
$$\Delta_h = \int \frac{\bar{M}_{T2} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_\theta^{(i)}} \bar{M}_{T2}^{(i)} \bar{M}^{(i)} \quad (11)$$

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است فشار
انفعالی وارده بر پوشش به جوانب آن اعمال می‌شود؛ اما این
موضوع فقط تحت شرایطی که مقدار نسبت تنش افقی به
قائم زمین کوچکتر از یک باشد، صادق است. برای مقادیر
نسبت تنش افقی به قائم بزرگتر از یک، پوشش تونل تمایل
به تغییر شکل به صورت بیضی ایستاده را دارد؛ بنابراین فشار
انفعالی وارده بر پوشش به سقف تونل انتقال خواهد یافت. به
بیان دیگر، فشار انفعالی وارده بر پوشش تونل در مواردی که
 $K > 1$ است در محدوده ۴۵- تا ۴۵ درجه بر پوشش اعمال
می‌شود [11] و [12]. شکل ۲ روند محاسبه و تعیین مقدار
گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش را
نشان می‌دهد. با توجه به این روند مقدار فشار انفعالی
توده‌سنگ (p_h) با تکرار مقدار جابجایی افقی، تعیین
می‌شود [5]. در ادامه تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای
مختلف انجام شده، که نتایج آن در زیر تشریح شده است.

۲-۱- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری در فشار هیدرواستاتیک $K=1$

در این حالت تمام بار وارده بر پوشش به نیروی محوری
تبدیل شده، مقدار گشتاور خمشی صفر است و نیروی
محوری با افزایش بار وارده افزایش می‌یابد. مقدار نیروی

نظر گرفت [5]. فرض شده است P_6 در محدوده‌ی ۴۵ تا
۱۳۵ درجه نسبت به سقف تونل است و از گزاره‌ی (۴)
بدست می‌آید [5].



شکل ۱- توزیع فشار وارده بر پوشش سگمنتی [5]

$$P_6 = P_h (1 - 2 \cos^2 \varphi) \quad , \quad P_h = K_s \Delta_h \quad (4)$$

با استفاده از گزاره‌های روش نیرو و با در نظر گرفتن
چرخش و جابجایی افقی برابر با صفر در سقف و کف تونل،
گزاره‌های (۵) و (۶) بدست می‌آید [5]:

$$x_1 = \frac{\delta_{12} \Delta_{2p} - \delta_{22} \Delta_{1p}}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{\delta_{21} \Delta_{1p} - \delta_{11} \Delta_{2p}}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \quad (6)$$

x_1 و x_2 به ترتیب گشتاور خمشی و نیروی محوری (در
واحد طول) اعمالی بر سقف، یعنی نیروهای زاید، و δ_{ii}
جابجایی‌های ایجاد شده در محل نیروی زاید x_i و هم جهت
با x_i بعلت اعمال نیروی واحد $x_i = 1$ ، δ_{ij} جابجایی ایجاد
شده در محل نیروی زاید x_i و هم جهت با x_j به علت
نیروی واحد $x_j = 1$ جابجایی ایجاد شده در محل
نیروی زاید x_i و هم راستا با x_i به سبب اعمال فشار زمین
دربرگیرنده است.

گشتاور خمشی و نیروی محوری داخلی در واحد طول
به علت اعمال نیروی واحد $x_1=1$ و $x_2=1$ می‌تواند به صورت
گزاره‌ی (۷) بیان شود.

$$\bar{M}_1 = 1 \quad \bar{M}_2 = R(1 - \cos \varphi) \quad (7)$$

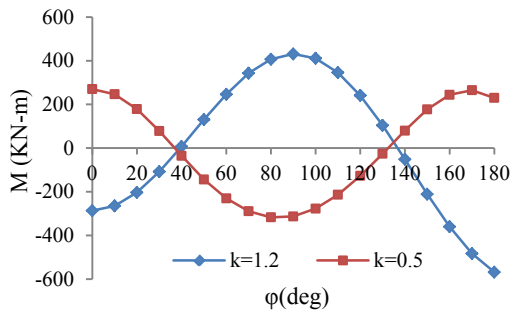
$$\bar{N}_1 = 0 \quad \bar{N}_2 = \cos \varphi$$

با استفاده از گزاره‌های تعادل نیرو، نیروهای حاصل از

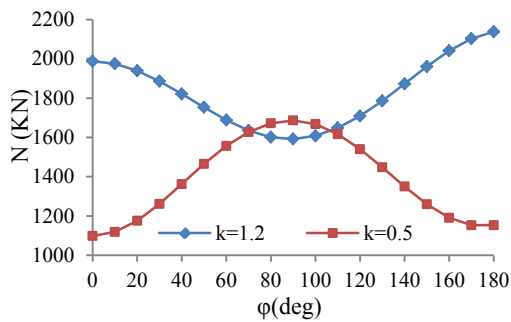
۲-۲- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

نسبت به مقدار K

با تغییر مقدار K، محل بیش‌ترین فشار وارده بر پوشش تغییر خواهد کرد؛ بنابراین در این حالت نمودارهای مربوط به گشتاور خمشی و نیروی محوری تقریباً قرینه خواهند بود. این موضوع برای پوشش دارای ۶ سگمنت در شکل ۵ و شکل ۶ برای دو حالت $K = 0.5$ و $K = 1.2$ نشان داده شده است. این نمودارها به عنوان نمونه بوده و در رسم آن‌ها شده است. $P_1 = 500 \text{ KN} / \text{m}^2$ و $K_s = 10000 \text{ KN} / \text{m}^3$ فرض



شکل ۵ - تغییرات گشتاور خمشی با مقدار K



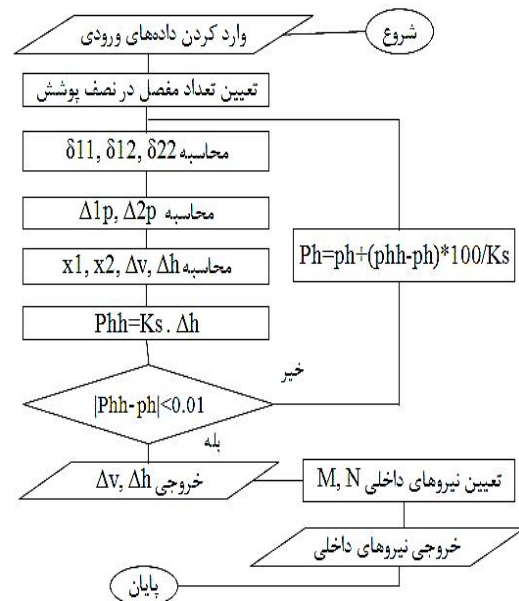
شکل ۶ - تغییرات نیروی محوری با مقدار K

۲-۳- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

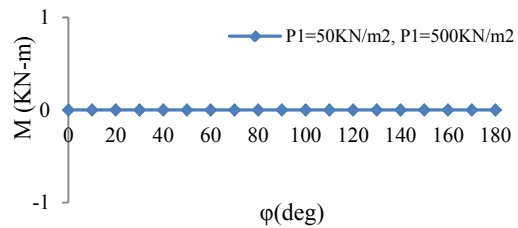
نسبت به مقدار سختی پیچشی مفاصل

کاهش سختی پیچشی مفاصل موجب افزایش انعطاف‌پذیری پوشش و کاهش گشتاور خمشی وارده بر پوشش می‌شود. از طرفی کاهش سختی پیچشی مفاصل موجب افزایش تغییر شکل پوشش و افزایش فشار انفعالی وارد بر آن خواهد شد؛ بنابراین نیروی محوری پوشش افزایش خواهد یافت. به

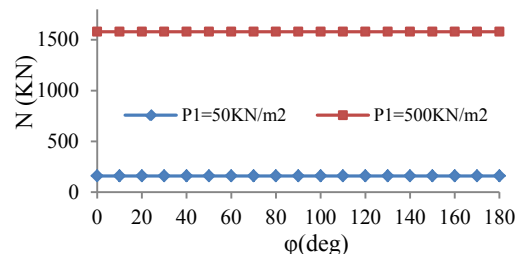
محوری در این حالت تقریباً برابر با نیروی محوری وارده بر استوانه‌های جدار نازک تحت بار یکنواخت است. با توجه به روندنمای شکل ۲ و بارهای P_1 تا P_6 ، مقادیر گشتاور خمشی و نیروی محوری محاسبه می‌شود. به علت وابستگی بارهای وارده بر پوشش به بار P_1 ، مقدار بار P_1 برای پوششی دارای ۶ سگمنت در شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۲- روندنمای محاسبه نیروهای داخلی پوشش [5]



شکل ۳- تغییرات ممان خمشی در حالت K=1

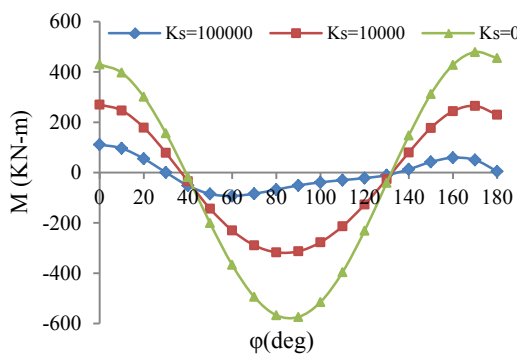


شکل ۴- تغییرات نیروی محوری در حالت K=1

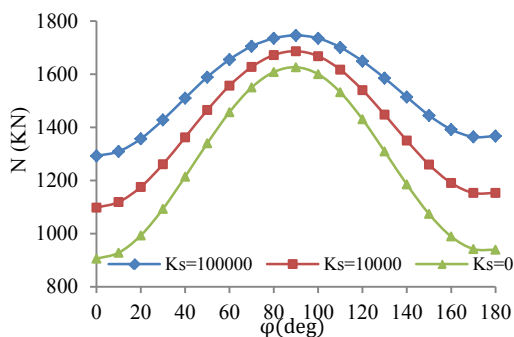
۲-۴- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

نسبت به مقدار K_s

افزایش مقدار ضریب مقاوم توده‌سنگ (K_s) در واقع بیانگر بهبود خصوصیات مقاومتی توده‌سنگ است که با افزایش آن محصورشدگی پوشش تونل در داخل توده‌سنگ افزایش یافته و از قابلیت تغییر شکل آن در برابر فشارهای وارده کاسته خواهد شد. از طرفی گشتاور وارد بر اجسام غیر صلب علاوه بر نیروی وارده، به تغییر شکل‌های جسم نیز بستگی دارد. با افزایش مقدار K_s گشتاور وارده بر پوشش کاهش خواهد یافت ولی فشار انفعالی وارده بر پوشش بیش‌تر خواهد شد؛ بنابراین نیروی محوری وارده بر پوشش افزایش خواهد یافت. این مسئله در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ برای پوششی با ۶ سگمنت تشریح شده است. همان‌طور در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار K_s مقدار گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش و نیروی محوری وارده اندکی افزایش یافته است. در این تحلیل، سختی مفاصل برابر سختی پوشش در نظر گرفته شده است.

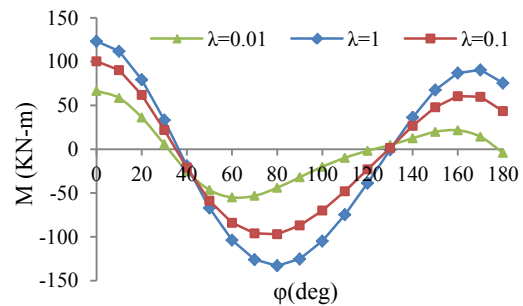


شکل ۱۰- تغییرات گشتاور خمشی با مقدار K_s

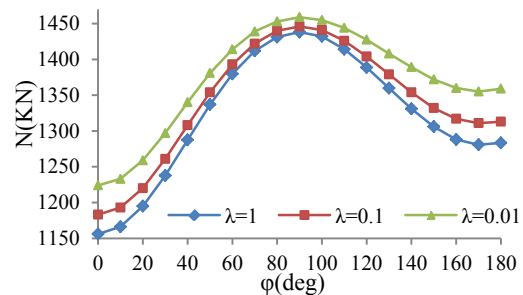


شکل ۱۱- تغییرات نیروی محوری با مقدار K_s

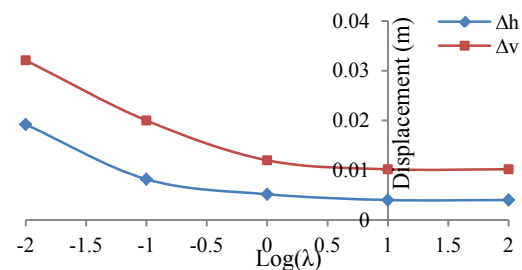
منظور درک بهتر اثر مفاصل، مقدار گشتاور خمشی و نیروی محوری برای سه حالت $\lambda=0.1$ ، $\lambda=1$ و $\lambda=0.01$ و پوششی با ۶ سگمنت در هر حلقه در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت سختی مفاصل به صورت نسبت سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش تعریف می‌شود ($\lambda = K_\theta / EI$). شکل ۹ نشان می‌دهد که جابجایی‌های قائم (Δ_v) و افقی (Δ_h) پوشش تونل، با کاهش مقدار λ افزایش می‌یابد. افزایش جابجایی‌های قائم و افقی پوشش تونل وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰٫۱ سختی پوشش است، بیش‌تر بوده و قابل توجه است. در این شکل محور افقی بر حسب لگاریتم، نشان‌دهنده‌ی نسبت سختی مفصل است.



شکل ۷- تغییرات گشتاور خمشی با مقدار سختی مفاصل



شکل ۸- تغییرات نیروی محوری با مقدار سختی مفاصل

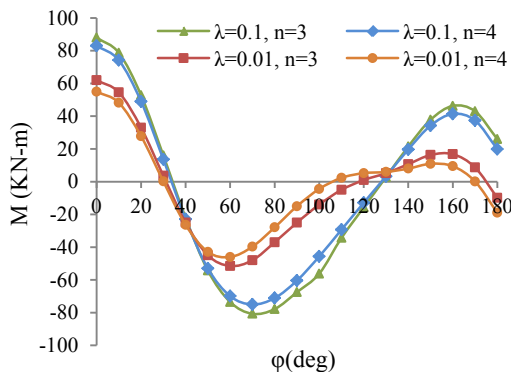


شکل ۹- جابجایی پوشش تونل با مقدار سختی مفصل

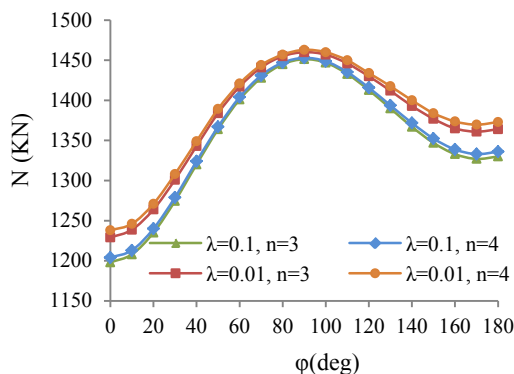
۲-۵- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری نسبت به تعداد مفاصل

افزایش تعداد مفاصل موجب افزایش انعطاف‌پذیری پوشش خواهد شد؛ بنابراین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل کاهش خواهد یافت. از طرفی افزایش تعداد مفاصل منجر به افزایش تغییر شکل پوشش و افزایش فشار انفعالی وارد بر آن خواهد شد و نیروی محوری پوشش که حساسیت زیادی بر فشار وارده بر پوشش دارد، افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵، گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش سگمندی دارای ۶ و ۸ عدد مفصل و نسبت‌های سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش برای دو حالت $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.01$ با هم مقایسه شده است.

شکل ۱۶ نیز نشان می‌دهد که جابجایی‌های پوشش تونل، با افزایش تعداد مفاصل، افزایش می‌یابد. افزایش جابجایی قائم پوشش تونل وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰٫۱ سختی پوشش است، بیش‌تر و قابل توجه است.



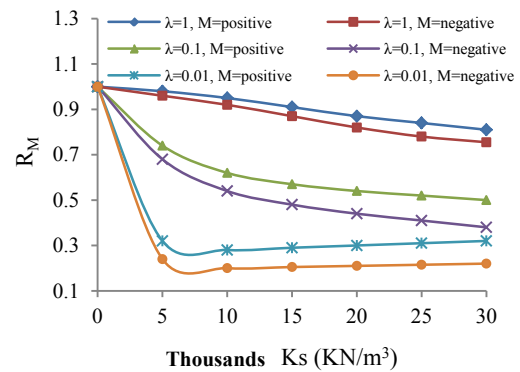
شکل ۱۴- تغییرات گشتاور خمشی با تعداد مفاصل



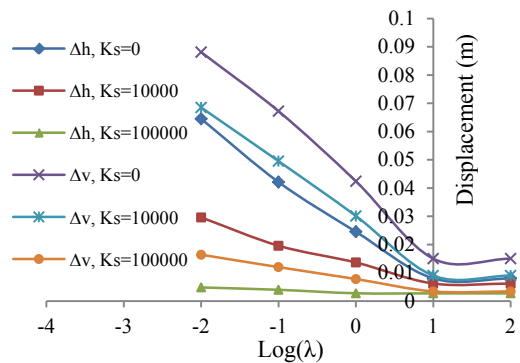
شکل ۱۵- تغییرات نیروی محوری با تعداد مفاصل

تأثیر ضریب مقاوم توده‌سنگ بر روی نسبت گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل به صورت شکل ۱۲ نیز قابل بررسی است. نسبت گشتاور خمشی (R_M)، به صورت قدر مطلق بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل با توجه به تأثیر مفاصل به قدر مطلق بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل یکپارچه تعریف می‌شود. هنگامی که $K_s = 0$ است، مقدار نیروی محوری و گشتاور خمشی به سختی مفاصل بستگی ندارد؛ بنابراین در این حالت مقدار نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل یکپارچه با پوشش سگمندی برابر است.

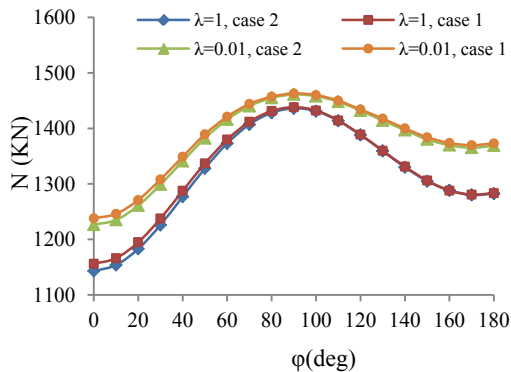
شکل ۱۳ نیز ارتباط بین جابجایی‌های تونل در مقابل لگاریتم نسبت سختی مفاصل با ضریب مقاوم توده‌سنگ متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، جابجایی‌های قائم و افقی به ضریب مقاوم توده‌سنگ با مقدار صفر، بیش‌تر از دو مقدار دیگر حساس بوده و تغییرات جابجایی بیش‌تری را نشان می‌دهد.



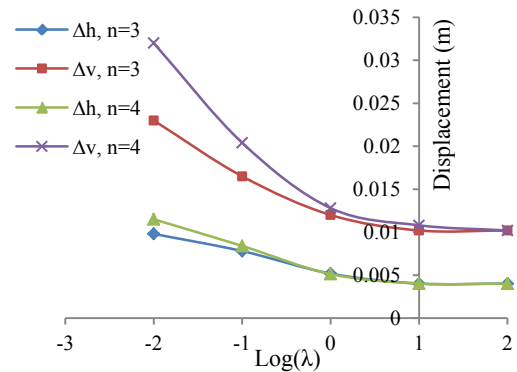
شکل ۱۲- تغییرات نسبت گشتاور خمشی با K_s



شکل ۱۳- جابجایی پوشش تونل با K_s

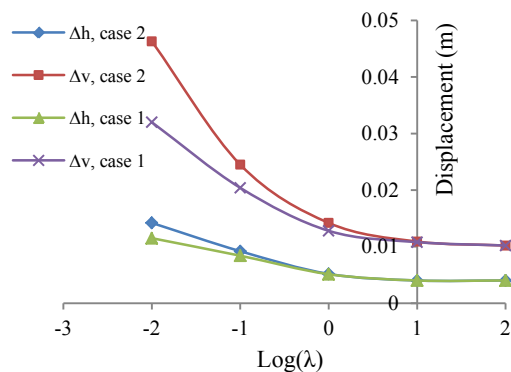


شکل ۱۸- تغییرات نیروی محوری با چیدمان مفاصل



شکل ۱۶- جابجایی پوشش تونل با تعداد مفاصل

شکل ۱۹، جابجایی‌های حاصل از دو حالت توزیع چیدمان مفاصل را نشان می‌دهد. جابجایی افقی حاصل از نحوه‌ی چیدمان مفاصل تغییر قابل توجهی ندارد؛ اما جابجایی قائم در حالت ۲، وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰/۱ سختی پوشش است، قابل توجه است.



شکل ۱۹- جابجایی پوشش تونل با چیدمان مفاصل

۲-۶- تاثیر نحوه‌ی چیدمان مفاصل بر گشتاور خمشی و نیروی محوری

به منظور بررسی تاثیر نحوه‌ی چیدمان مفاصل بر گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش دارای ۸ سگمنت، دو نوع چیدمان با زاویه‌ی مفاصل گوناگون به شرح ذیل در نظر گرفته شده است:

حالت اول: ۳، ۴۸، ۹۳، ۱۳۸، ۱۸۳، ۲۲۸، ۲۷۳ و ۳۱۸ درجه
حالت دوم: ۳۵، ۸۰، ۱۲۵، ۱۷۰، ۲۱۵، ۲۶۰، ۳۰۵ و ۳۵۰ درجه

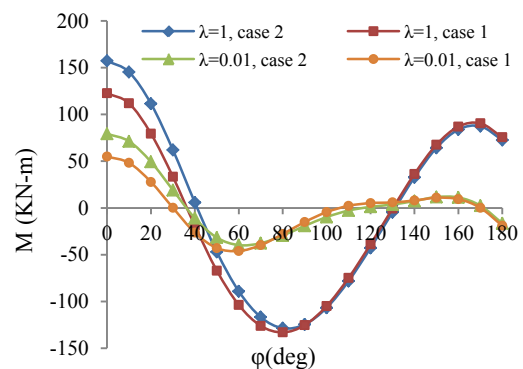
سپس برای هر یک از موقعیت‌های قرارگیری مفاصل، گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش، مطابق شکل ۱۷ و شکل ۱۸ محاسبه شده است. با افزایش زاویه‌ی مفاصل (نسبت به سقف تونل) مقدار گشتاور خمشی افزایش و نیروی محوری کاهش می‌یابد؛ بنابراین در وضعیتی که اولین مفصل پوشش در سقف تونل واقع شود، چیدمان مفاصل از دیدگاه سازه‌ای، بهینه است.

۳- طراحی سازه‌ای پوشش تونل

برای طراحی پوشش تونل، باید مقاومت اسمی آن (S_n) توسط ضریبی (ϕ) کاهش داده شود. مقاومت کاهش یافته باید در برابر بارهای وارده بر پوشش (P) که به سبب اضافه بار احتمالی، توسط ضریب β افزایش داده شده‌اند، طبق گزاره‌ی (۱۲) ایمن باشد [۱۳].

$$\phi S_n \geq \beta P \quad (12)$$

نمودار اثر متقابل پوشش، ترکیب‌های قابل قبول گشتاور خمشی و نیروی محوری را در عضو بتن مسلح یا غیر مسلح نشان می‌دهد. نمودار توزیع تنش در سطح مقطع



شکل ۱۷- تغییرات گشتاور خمشی با چیدمان مفاصل

از ردیف رسوبی کراتاسه قرار گرفته و دگرگونی ضعیفی را پشت سر گذاشته است. این پهنه‌ی گسترده به لحاظ ترکیب سنگ‌شناختی اولیه از تناوب شیل و ماسه‌سنگ تشکیل و تحت اثر دگرگونی دینامیکی به تناوب اسلیت و فیلیت تبدیل شده است. این دگرگونی موجب شده است طبیعت توده‌سنگ بسیار درزه‌دار و فاصله‌داری درزه‌ها کم باشد. مدول یانگ و نسبت پواسون در طول مسیر تونل بلند انتقال آب به ترتیب ۴ گیگاپاسکال و ۰٫۲۸ است. سایر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ به شرح جدول ۱ است [۱۶].

جدول ۱- تفکیک تونل بلند انتقال آب سد سردشت به محدوده‌های مختلف [۱۶]

GSI	σ_{ci} (MPa)	C (MPa)	ϕ (deg)	h_0 (m)	h (m)
۳۵	۲۰	۰٫۱۷	۳۷	۲۲	۵۰
۳۵	۲۲	۰٫۲۶۵	۳۲٫۵۲	۵۲	۱۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۴۱۳	۳۲	۱۱۰	۱۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۴۸۸	۳۰٫۶	۱۴۰	۲۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۵۵۷	۲۸٫۹۳	۱۹۰	۲۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۶۲۱	۲۷٫۵۹	۲۱۵	۳۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۶۸۱	۲۶٫۴۷	۲۶۰	۳۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۷۳۷	۲۵٫۵۲	۱۹۰	۴۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۷۹۱	۲۴٫۶۸	۲۰۰	۴۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۸۴۲	۲۳٫۹۵	۲۱۰	۵۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۸۹۱	۲۳٫۳	۲۳۰	۵۵۰

۵- ارزیابی پوشش طراحی شده تونل بلند انتقال آب سد سردشت با روش تحلیلی

با توجه به جدول ۱، میزان بار وارده بر پوشش تونل در سقف و دیواره‌ی تونل (P_1 تا P_6) تعیین شده است. در ادامه، نیروهای داخلی وارده بر پوشش در محدوده‌های مختلف تعیین و سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش برای این تحلیل، برابر با ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات پوشش نیز به شرح جدول ۲ است [۱۶].

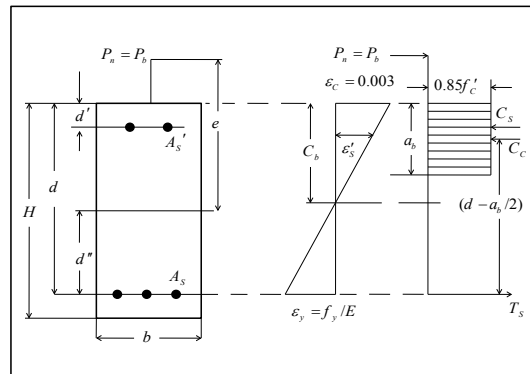
به منظور بررسی مناسب بودن سطح مقطع انتخاب شده برای پوشش، باید ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر آن در داخل نمودار اثر متقابل قرار گیرد. با استفاده از این روش، پایداری پوشش انتخاب شده در تمام

پوشش را می‌توان به صورت شکل ۲۰ در نظر گرفت. با توجه به این شکل، ترکیبی از نیروی محوری و گشتاور خمشی که منجر به گسیختگی پوشش بتن مسلح می‌شود، می‌تواند از گزاره‌های (۱۳) و (۱۴) تعیین شود [۱۴].

$$P_n = C_s + C_c - T_s \quad (13)$$

$$M_n = C_s \times \left(\frac{H}{2} - d' \right) + C_c \times \left(\frac{H}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + T_s \times \left(d'' - \frac{H}{2} \right) \quad (14)$$

که در آن $T_s = A_s f_y$ ، $C_c = 0.85 f'_c b a_b$ ، $C_s = A'_s f_y$ است.



شکل ۲۰- نمودار توزیع تنش در سطح مقطع پوشش [۱۴]

۴- موقعیت زمین شناسی و جغرافیایی سد سردشت

سد سردشت در شمال غربی ایران و در جنوب غربی شهرستان سردشت از استان آذربایجان غربی قرار گرفته است. ساختگاه سد در ۱۲ کیلومتری جنوب غربی شهر سردشت و بر روی رودخانه‌ی کلاس است. ورودی تونل انتقال آب در تکیه‌گاه چپ سد واقع شده که دسترسی به آن از طریق ساختگاه سد امکان پذیر است. کاربری تونل بلند سد سردشت از نوع آب‌بر و تحت فشار است. طول کلی تونل از بخش ورودی تا خروجی حدود ۴۳۰۰ متر خواهد بود. بخش حفاری مکانیزه آن شامل یک رشته تونل به طول ۴۰۰۰ متر و قطر ۶٫۵۴ متر است که وظیفه‌ی انتقال آب را به عهده دارد [۱۵].

ساختگاه سد و سازه‌های مربوطه در پهنه‌ی گسترده‌ای

تمام محدوده‌ها در داخل نمودار اثر متقابل قرار می‌گیرد؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است.

محدوده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌ی این بررسی در شکل ۲۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۱، مشخص است که تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی وارده بر پوشش در

جدول ۲- مشخصات سامانه‌ی نگهداری مورد استفاده [۱۶]

پارامتر	مقدار
قطر خارجی پوشش سگمنتی	۶۳ متر
ضخامت پوشش سگمنتی	۳۰ سانتی‌متر
تعداد سگمنت در هر حلقه	۶ قطعه (با قطعه کلید)
مقاومت فشاری تک محوره‌ی بتن پوشش	۳۵ مگاپاسکال
تنش تسلیم فولاد	۴۰۰ مگاپاسکال
قطر آرماتورها ($\phi 18@15$)	۱۸ میلی‌متر
فاصله‌درای آرماتورها	۱۵ سانتی‌متر
ضخامت پوشش بتن روی آرماتورها	۶ سانتی‌متر

نمونه این موضوع برای محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر در شکل ۲۳ نشان داده شده است. برای تشخیص مناسب بودن پوشش انتخاب شده، ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش در داخل نمودار اثر متقابل قرار داده شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۲۴ برای تمام محدوده‌ها آورده شده است. به دلیل این‌که نسبت تنش افقی به قائم زمین برابر با ۱ در نظر گرفته شده است، قسمت بیش‌تر بار وارده بر پوشش تونل به نیروی محوری تبدیل می‌شود و گشتاور خمشی وارده بر پوشش کوچک است. همان‌طور که در شکل ۲۴ نشان داده شده، تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش، در تمام محدوده‌ها در داخل نمودار اثر متقابل قرار می‌گیرد؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است.

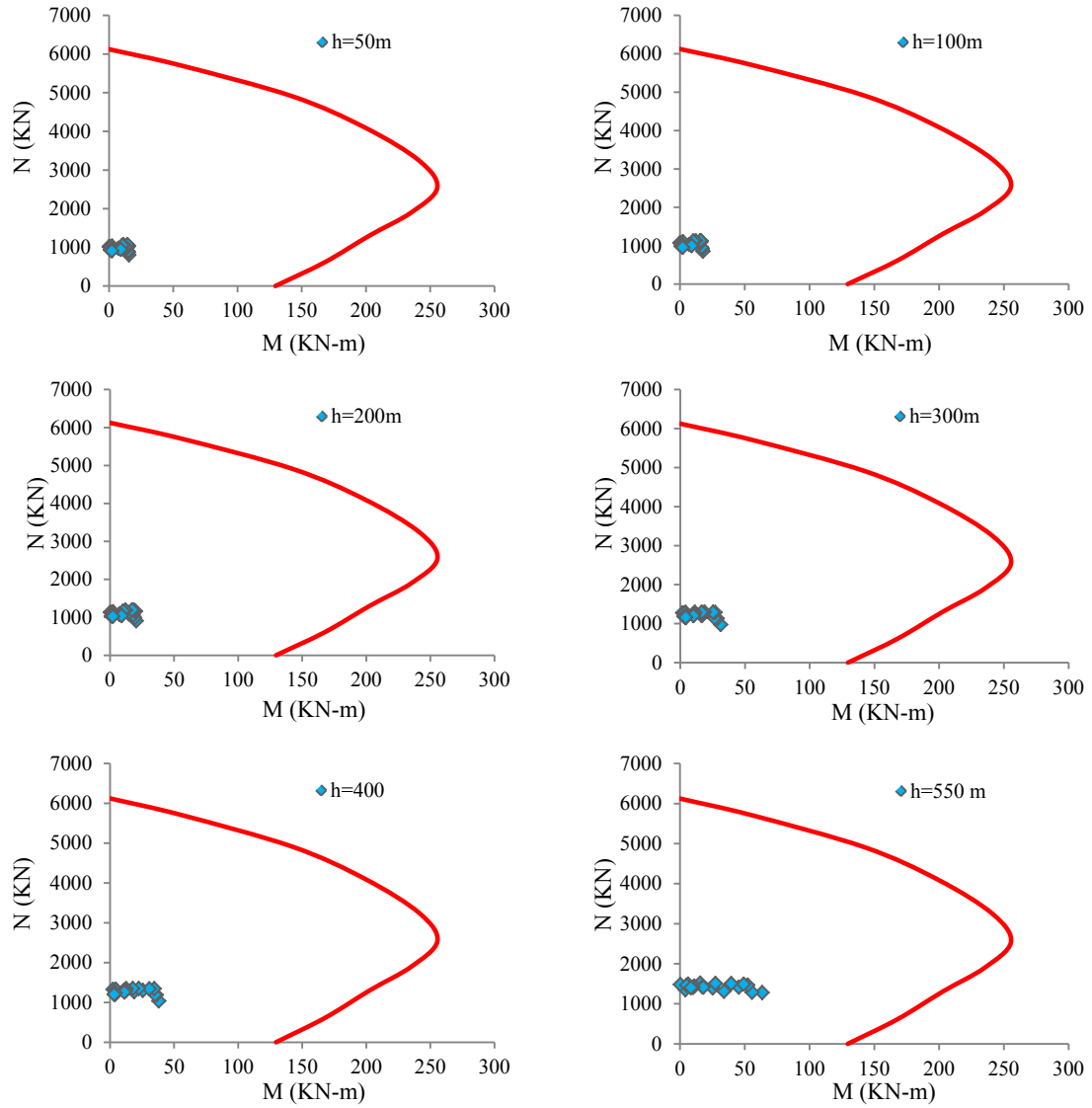
با فرض این‌که نسبت تنش افقی به قائم در طول مسیر تونل بلند انتقال آب سد سردشت بین ۰٫۷ تا ۱٫۳ متغیر است؛ بنابراین پایداری پوشش برای این حالت نیز باید بررسی شود. برای این منظور محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر (دارای کمترین مقدار فاکتور ایمنی) انتخاب شده است. برای این محدوده، با روش عددی، نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر تونل در دو حالت نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰٫۷ و ۱٫۳ تعیین و ترکیب آن‌ها در نمودار اثر متقابل پوشش منتخب، قرار داده شده است. نتیجه این بررسی در شکل ۲۵ و شکل ۲۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده، ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش یکپارچه برای محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر، درون نمودار اثر متقابل قرار گرفته است. مقدار فاکتور ایمنی در محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر برای پوشش یکپارچه ۲٫۲۲ و برای پوشش سگمنتی ۳٫۱۴ برآورد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب ایمنی پوشش با در نظر گرفتن مفاصل بیش‌تر است.

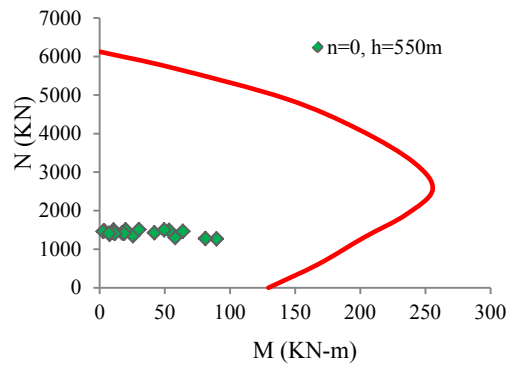
۶- ارزیابی پوشش طراحی شده تونل بلند انتقال آب سد سردشت با روش عددی

برای محاسبه‌ی نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده بر پوشش به روش عددی با توجه به شرایط منطقه‌ی سد سردشت می‌توان توده‌سنگ را به صورت پیوسته در نظر گرفت و از نرم افزار *FLAC* استفاده نمود. به این سبب که تونل توسط *TBM* با طول سپر ۱۲ متر حفر می‌شود؛ بنابراین ابتدا به مدل ساخته شده، اجازه‌ی آزادی تنش داده می‌شود و سپس پوشش تونل توسط المان ساختاری *Liner* مدل می‌شود [۱۷]. در این تحلیل سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش ۰٫۱ و نسبت تنش افقی به قائم زمین برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. در تمامی محدوده‌ها، نیروهای داخلی وارده بر پوشش تونل توسط نرم‌افزار *FLAC* برآورد شده است. به عنوان

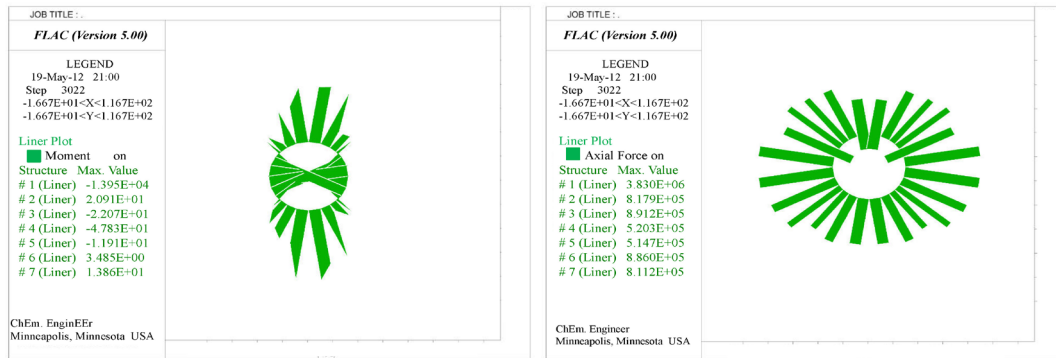
طراحی پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به تأثیر مفاصل قطعات پوشش: ص ۴۳-۵۶



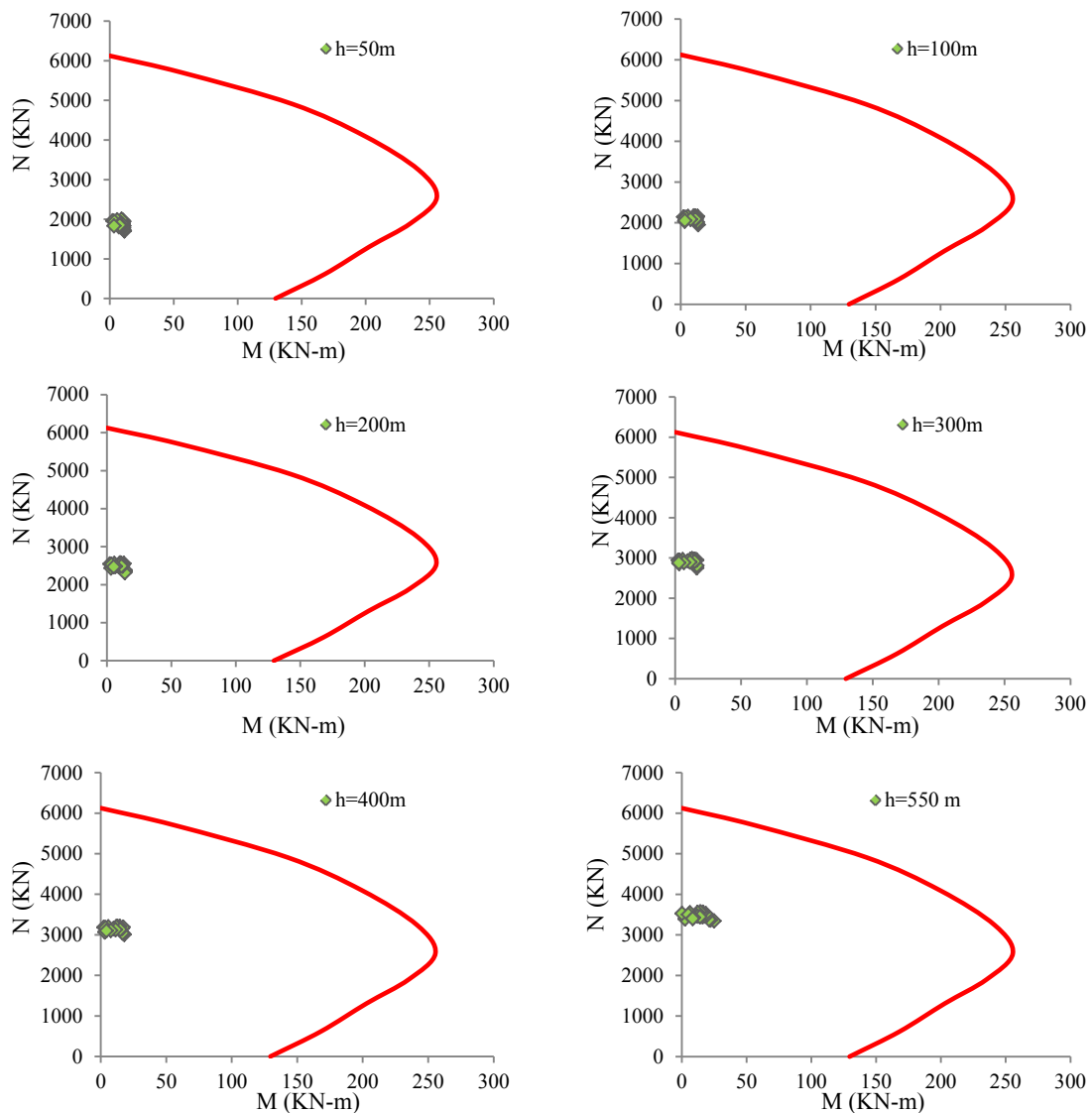
شکل ۲۱- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش انتخاب شده در تمام محدوده‌ها



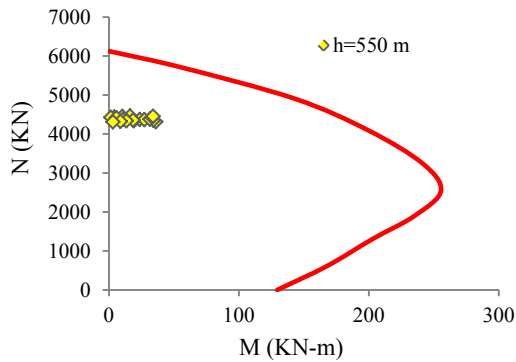
شکل ۲۲- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش یکپارچه در محدوده‌ی باربری ۵۵۰ متر



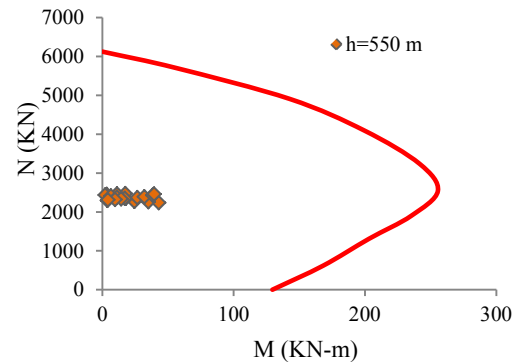
شکل ۲۳- نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش با روباره‌ی ۵۵۰ متر



شکل ۲۴- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش با روش عددی برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱



شکل ۲۶- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱/۳



شکل ۲۵- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷

۷- نتیجه‌گیری
در پوشش‌های سگمنتی حضور مفاصل سبب کاهش صلبیت پوشش و مقدار گشتاور خمشی وارده بر پوشش می‌شود. اما نیروی محوری وارده بر پوشش در دو حالت پوشش یکپارچه و سگمنتی تفاوت محسوس با یکدیگر نخواهد داشت. به دلیل پایین بودن مقاومت کششی بتن، در اغلب طراحی‌ها گشتاور خمشی، کنترل کننده‌ی ضخامت پوشش است؛ بنابراین در نظر گرفتن اثر مفاصل سبب کاهش گشتاور خمشی و استفاده از پوشش با ضخامت کمتر می‌شود.
در این پژوهش برای پوشش سگمنتی با بکارگیری روش تحلیلی، تأثیر نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب مقاوم توده‌سنگ، سختی، نحوه‌ی توزیع و تعداد مفاصل بررسی و گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل در اثر نیروهای درونی وارد بر پوشش محاسبه شده است. در روش تحلیلی تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به اثر مفاصل درون نمودار اثر متقابل قرار گرفته؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است. گشتاور خمشی و نیروی محوری

وارد بر پوشش یکپارچه نیز در داخل نمودار اثر متقابل قرار گرفته است. فاکتور ایمنی برای پوشش پیوسته و سگمنتی به ترتیب برابر با ۲/۲۲ و ۳/۱۴ برآورد شده است.
نسبت تنش افقی به قائم در طول مسیر تونل بلند انتقال آب سد سردشت بین ۰/۷ تا ۱/۳ متغیر است. در روش عددی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC* نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش تونل در سه حالت نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷، ۱ و ۱/۳ برآورد شده و ترکیب آن‌ها درون نمودار اثر متقابل پوشش قرار گرفته است. در نهایت پوشش سگمنتی مد نظر با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در همه‌ی محدوده‌ها پایدار بوده است. در روش تحلیلی نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نیروهای داخلی حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی می‌توان نتیجه گرفت که این روش‌ها در تخمین گشتاور خمشی اختلاف کمی دارند؛ اما مقدار نیروی محوری در روش تحلیلی کمتر تخمین زده شده است. علت این امر در نظر گرفتن شش نوع بار وارده به پوشش سگمنتی در روش تحلیلی است که در نرم‌افزار و در طبیعت مقدار آن‌ها بیش‌تر است.

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
E_s	KN/m^2	مدول یانگ توده‌سنگ	P_6	KN/m^2	فشار مقاوم توده‌سنگ
E	KN/m^2	مدول یانگ پوشش	P_h	KN/m^2	فشار انفعالی توده‌سنگ
v_s	-	نسبت پواسون توده‌سنگ	K_s	KN/m^3	ضریب مقاوم توده‌سنگ
v	-	نسبت پواسون پوشش	Δh	m	جابجایی افقی پوشش

جابجایی قائم پوشش	m	Δ_v	لختی دورانی پوشش	m^4	I
مقدار زاویه از سقف تونل	deg	φ	شعاع خارجی پوشش	m	R
تعداد مفصل در نصف حلقه‌ی پوشش	-	n	لختی دورانی پوشش بدون مفصل	m^4	I_o
ارتفاع مقطع (ضخامت پوشش)	m	H	لختی دورانی پوشش در محل مفصل	m^4	I_j
عرض سطح مقطع	m	b	گشتاور خمشی در واحد طول	$KN-m$	M
عرض مقطع تحت تنش فشاری	m	a_b	نیروی محوری در واحد طول	KN	N
ضخامت پوشش بتنی آرماتور	m	d'	تعداد سگمنت	-	N'
فاصله‌ی آرماتور از تار خنثی	m	$d//$	ضریب کاهش گشتاور خمشی	-	η
تنش تسلیم فولاد	KN/m^2	f_y	سختی پیچشی مفاصل	$KN-m/rad$	K_θ
مقاومت فشاری بتن	KN/m^2	f_c	زاویه‌ی مفصل نام نسبت به سقف تونل	deg	φ_i
مساحت کل آرماتور فشاری	m^2	A_s'	فشار قائم توده‌سنگ روباره	KN/m^2	P_1
مساحت کل آرماتور کششی	m^2	A_s	فشار عکس‌العمل کف پوشش	KN/m^2	P_2
ارتفاع روباره	m	h	فشار جانبی زمین در سقف پوشش	KN/m^2	P_3
مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ	MPa	σ_{ci}	فشار جانبی اضافی در کف پوشش	KN/m^2	P_4
تراز آب زیرزمینی	m	h_0	وزن پوشش	KN/m^2	P_5

۹- منابع‌ها

- [1] Kim, S. H., Pelizza, S., & Kim, J. S. (2006). A study of Strength Parameters in the Reinforced Ground by Rock Bolts. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 378-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.192>.
- [2] Kim, H. J., & Eisenstein, Z. (2006). Prediction of Tunnel Lining Loads Using Correction Factors. *Engineering Geology*, 85 (3-4), 302-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.001>.
- [3] Wood, A. M. (1975). The Circular Tunnel in Elastic Ground. *Geotechnique*, 25 (1), 115-127. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1975.25.1.115>.
- [4] Lee, K. M., & Ge, X. W. (2001). The Equivalent of The Jointed Shield Driven Tunnel Lining to A Continuous Ring Structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 461-483. <http://dx.doi.org/10.1139/t00-107>.
- [5] Lee, K. M., & Hou, X. Y., Ge, X. W., Tang, Y. (2001). An Analytical Solution for A Jointed Shield-Driven Tunnel Lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(4), 365-390. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.134>.
- [6] Koyama, Y. (2003). Present Status and Technology of Shield Tunneling Method in Japan. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 145-159. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00040-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00040-3).
- [7] Lu, L., Lu, X., & Fan, P. (2011). Full-Ring Experimental Study of The Lining Structure of Shanghai Changjiang Tunnel. *Civil Engineering and Architecture*, 45(8), 732-739. ISSN :1934-7359.
- [8] Xiaochun, Z., Wei, Z., Zhengrong, H., & Yuewang, H. (2006). Effect of Joint Structure on Joint Stiffness for Shield Tunnel Lining. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 406-407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.215>.

- [9] Teachavorasinskun, S., & Chub-uppakarn, T. (2010). Influence of Segmental Joints on Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 490-494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.003>.
- [۱۰] مختاریان، م.، جعفری، ا.، و اسماعیلی، م. (۱۳۸۸). تحلیل پایداری پوشش سگمنتی تونل خط ۲ قطار شهری تبریز. هشتمین کنفرانس تونل/ایران (ص. ۲۱۵ - ۲۱۱). تهران، ایران: دانشگاه تربیت مدرس. شابک: ۱۷۳۵-۵۵۴۰.
- [11] Hefny, A. M., & Chua, H. C. (2006). An Investigation into the Behaviour of jointed Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 428-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070>.
- [12] Roland, W. (2000). *Steel Fibre Reinforced Tunnel Segments for The Application in shield Driven Tunnel Lining* (pp. 35-44). Netherland: Doctoral Thesis, Delft University of Technology. ISBN:90-407-1965-9.
- [۱۳] مستوفی نژاد، د. (۱۳۸۶). *سازه‌های بتن آرمه (جلد اول)*. (ص. ۱۴۱ - ۱۳۵). اصفهان: انتشارات ارکان دانش. شابک: ۷۴-۴-۹۶۴-۷۳۰۸.
- [۱۴] طاحونی، ش. (۱۳۸۳). *طراحی سازه‌های بتن مسلح (چاپ اول)*. (ص. ۳۲۸ - ۳۲۱). تهران: انتشارات دهخدا. شابک: ۹۶۴۶۵۷۲۱۴۶.
- [۱۵] شرکت مهندسی مشاور سپاسد- فراب. (۱۳۹۰). *گزارش زمین‌شناسی مهندسی مطالعات مرحله‌ی دوم*. تهران. کد طرح: ۵۵۸۷۳۴۰.
- [۱۶] شرکت مهندسی مشاور سپاسد- فراب. (۱۳۹۰). *گزارش بازننگری مرحله‌ی دوم پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ*. تهران. کد طرح: ۵۵۸۷۳۴۱.
- [17] Structural Elements. (2007). *FLAC User's Guide, 5th*. Minneapolis, Minnesota, United States of America: ITASCA Consulting Group, Inc.