نشریه تحقیقاتی فنی ـ مهندسی استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان شماره ۱۳ شهریورماه ۱۳۷۲

الگوریتمی برای تحلیل محافظ تونلها به روش اجزاء محدود براساس نظریه وینکلر

حمیدرضا اسلیمی* ـ محمدمهدی سعادت‌پور** ـ محمود وفائیان***

چکیده

در سالهای اخیر، روشهای متنوعی برای تحلیل و طرح محافظ تونلها ارائه شده است. این روشها عمدتاً به تونلهای با مقطع دایره ای و توزیع فشار هیدرواستاتیک اختصاص داشته ندرتاً برای مقاطع و فشارهای متنوع به‌کار می روند. در این مقاله یک روش بررسی مشابه اما با سهولت درکاربرد و با دقت کافی ارائه شده است. در این روش بر اساس نظریه وینکلر، رفتار محیط پیوسته طبیعی که تونل درآن حفر شده است توسط میله (فنر)های الاستیک منفرد تکیه گاهی مدل شده و مسأله در حالت کرنش مستوی حل می شود. در این تحلیل، بررسی چگونگی رفتار متقابل زمین و سازه و تأثیر وجود اصطکاک بین زمین و سازه امکان پذیر است. از مزایای این روش، امکان کاربرد آن برای تحلیل تونلها با

---

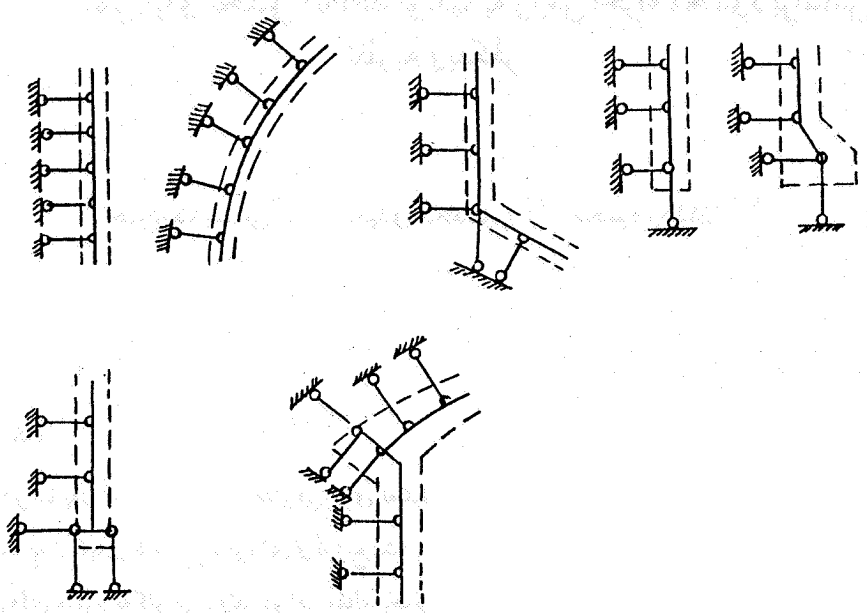
* فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی اصفهان

** استادیاردانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی اصفهان

*** دانشیاردانشکده مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی اصفهان

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

مقاطع مختلف (ازنظرشکل، ضخامت وجنس محافظ) ودرشرایط متنوع ازنظرفشاروارده وژئوتکنیک محل است. برای کاربردصحیح وسریع این روش یک الگوریتم نسبتاً کامل ارائه ونتایج محاسباتی الگوریتم بکار رفته دراین تحقیق بانتایج کارهای محاسباتی موجود دراین زمینه مقایسه می شود. سرانجام، با حل یک مسأله نمونه، چگونگی کاربرد این روش در تحلیل محافظ تونلها نشان داده می شود.



شکل ۱ - موقعیت اجزاء میله ای در شرایط مختلف

مقدمه

در سازه های زیرزمینی، محیط اطراف تونل نه تنها اعمال کنندهٔ بار به سیستم است، بلکه به منظور پایداری و جلوگیری از تغییر مکان سازه نقش تکیه گاه را نیز ایفا می کند و خصوصیات الاستیکی محیط باعث توزیع تغییر مکان و تنش در سازه می شود. از طرفی بر خلاف سازه های متداول که معمولاً ابتدا عمل ساخت صورت می گیرد و سپس بارهای طراحی اعمال می شود، در تونل زیر زمینی قبل از حفاری و نصب سازه محافظ یک سیستم تنش (تحت تأثیر شرایط کوهزایی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

و بار توده های فوقانی) در زمین وجود دارد که با ایجاد حفاری این سیستم تنش آزاد شده و تغییر مکانهایی در محیط ایجاد می کند که برای کنترل آن از سازهٔ محافظ استفاده می شود. کاربرد اصول مکانیک سازه ها در تحلیل استاتیکی محافظ تونلها بر مبنای ارائه الگویی است که هر سه سیستم در گیر در مسأله، یعنی سازه، تکیه گاهها و بارهای اعمالی را در بر می گیرد. بر حسب ضرورت، توسعه و تعمیم حل مسأله سه مرحله را به شرح زیر طی کرده است ([۱ و ۲]).

الف - بررسی سازه تنهاتحت اثربار اعمالی توسط محیط طبیعی و نادیده گرفتن تأثیر شرایط تکیه گاهی الاستیک که باعث کاهش تغییر شکلها می شود(سازهٔ آزاد).

ب - مدل کردن عکس العمل محیط طبیعی بر روی سازه در قالب تکیه گاههای الاستیک، که در این مدل، رابطه مشخصه ای که بین تغییر شکلهای سازهٔ محافظ و عکس العمل تکیه گاههای الاستیک وجود دارد، تغییر مکان سازه راکنترل می کند.

پ - مدل کردن سازه و محیط طبیعی در قالب اجزاء محدود به کمک اجزاء دو یا سه بعدی و با استفاده از نظریه الاستیسیته. در این حالت وزن تودهٔ سنگ یا خاک و سایر فشارهای موجود و همچنین عکس العمل محیط طبیعی از طریق پیوستگی اجزاء به طور طبیعی به محافظ منتقل می شود.

انتخاب هر یک از این روشهابا توجه به جنس محیط، نوع بارهای مؤثر، امکانات محاسباتی و اجرایی صورت می گیرد. در مقالهٔ حاضر، تحلیل محافظ تونل بر اساس فرض وینکلر مورد بررسی قرار می گیردو مدل تکیه گاههای میله ای برای تحلیل محافظ تونل معرفی شده و روابط تئوریک مناسب بیان می گردد.

مدل میله‌ای برای تحلیل مقطع محافظ تونل

در روشهای محاسباتی مبتنی‌برفرض قرارگرفتن محافظ تونل بریک بسترالاستیک، هدف‌اصلی مرتبط ساختن تغییر شکل‌اجزاء سازهٔ نگهدارندهٔ تونل باعکس‌العمل تکیه گاه‌الاستیک (محیط طبیعی) است. فرضیاتی‌که دراین روشهامدنظر قرارمی گیرند، براساس فرض وینکلر، یعنی خطی بودن رابطهٔ بین فشار وتغییر مکان، استوارند. درفرض وینکلر، فشارمقاوم محیط (درهرنقطه) توسط

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

رابطهٔ زیربه تغییر مکان سازه (در همان نقطه) و ضریب عکس‌العمل محیط مرتبط می شود [۱].

$$P = K\Delta \qquad (۱)$$

در این رابطه P فشار مقاوم، K ضریب عکس العمل محیط و Δ تغییر مکان سازه است. برای تحلیل محافظ تونلهای واقع بر بستر الاستیک، محققینی از جمله وینکلر، داویدف، اورلف و کواک پیشنهاد می کنند که بستر الاستیک با میله ها یا فنرهایی خطی که سختی آنها متناسب با ضریب واکنش محیط بوده و به صورت عمود بر پوشش قرار می گیرند، مدل شوند [۲]. همچنین چسبندگی و اصطکاک بین سازه و محیط (که معمولاً تأثیر چندانی در حل نهایی ندارد) به کمک اجزاء فنری مماسی در نظر گرفته می شود. این روش یکی از بهترین روشهای مناسب برای محیطهای سنگی است [۱].

ضریب واکنش نرمال محیط (K_n) به صورت زیر است [۳]:

$$K_n = \frac{E}{(1+\nu)D} \qquad (۲)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون محیط است. همچنین داریم:

$$D = \begin{cases} R & \text{برای تونل با مقطع دایره ای} \\ \sqrt{\frac{S}{\pi}} \text{ یا } \frac{Q}{2\pi} \text{ یا } \frac{B}{2} & \text{برای تونل با مقطع غیر دایره ای} \\ 1.34\ (1+\nu)a & \text{برای گره های تکیه گاهی محافظ های باز} \end{cases} \qquad (۳)$$

به طوری که R شعاع مقطع تونل، S مساحت مقطع، Q محیط مقطع، B عرض مقطع و a ضخامت گرهٔ تکیه گاهی است

از آنجا که لازم است سختی میله ها با سختی محیط یکسان باشد می توان نوشت:

$$\frac{E_r.A}{l} = b.d.K_n \qquad (۴)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

که در این رابطه A سطح مقطع میله ای نرمال یا مماسی، l طول میله های نرمال یا مماسی، b بعد محاسباتی تونل در جهت طولی، d میدان عکس العمل محل تماس محافظ و محیط برای میله ها، $d = (c_i + c_{i+1})/2$ که در آن c_i و c_{i+1} فاصلهٔ هر گره تا دو گرهٔ مجاور روی محافظ و E_r مدول الاستیسیتهٔ میله هاست که معمولاً مساوی مدول الاستیسیتهٔ محافظ، E_s، اختیار می شود. بنابراین سطح مقطع میله های عمودی

$$A_n = \frac{1.b.d}{D} \frac{(1-\nu_s^2)E}{(1+\nu)E_s} \qquad (۵)$$

و سطح مقطع میله های مماسی

$$A_t = \begin{cases} A_n(tg\phi + \frac{c(1+\nu)}{E}) & \text{محیط خاکی} \\ A_n \frac{3}{5-6\nu} & \text{محیط سنگی} \end{cases} \qquad (۶)$$

است که E_s مدول الاستیسیتهٔ محافظ، ν_s ضریب پواسون محافظ، ϕ زاویهٔ اصطکاک بین محیط و محافظ و c چسبندگی بین محیط و محافظ است.

از سوی دیگر لازم است که برای تمام میله های مماسی معادلهٔ زیر صادق باشد:

$$|T| < |N| \, tg\phi + (d.b)c \qquad (۷)$$

که در آن، T نیرو در عضو مماسی و N نیرو در عضو عمودی است. در غیر این صورت لازم است سختی میله ای که رابطهٔ (۷) برای آن صادق نیست، با ضریب 0.9β کاهش یابد که β طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$\beta = \frac{|N| + tg\phi.(d.b)c}{|T|} \qquad (۸)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

اجزای فنری (میله ای) عمود بر محافظ فقط نیروهای فشاری را تحمل می کنند. بنابراین در نواحی خاصی از سازه که در اثر بار وارده تغییر شکل سازهٔ محافظ در جهت مخالف محیط رخ دهد (ناحیه جداشدگی)، در نظر گرفتن اجزای میله ای در الگوی محاسباتی محافظ بی معنی خواهد بود. لذا هر گاه پس از تحلیل سازهٔ محافظ مشخص شد که تعدادی از فنرهای عمودی در وضعیت کششی قرار می گیرند، باید آنها را حذف کرده و سازهٔ محافظ را مجدداً تحلیل نمود. این کار تا مرحله ای ادامه می یابد که ناحیهٔ جدا شدگی سازهٔ محافظ از محیط تعیین شود. عدم حذف یک جزء عمودی تکیه گاهی که تحت کشش قرار می گیردمشابه با اعمال یک نیروی کششی متناسب با سختی محیط به محافظ است که این کار مدل را بی اعتبار می سازد . علاوه بر این، چون سختی محیط که به شکل پیوسته است به صورت گسسته مدل می شود، بار اعمال شده به سازه نیز در قالب تعدادی نیروهای متمرکز در محل اجزاء فنری (میله ای) در نظر گرفته می شود. همچنین در بیشتر موارد برای سهولت شکل منحنی محافظ تونل با خطوط شکسته جایگزین می گردد.

در این مسأله شرایط هندسی ووضعیت بارگذاری به ترتیبی است که مسأله حقیقی سه بعدی را می توان در قالب یک مسأله دو بعدی تحلیل نمود. همچنین چون بعد سازه در راستای محور طولی بسیار بزرگتر از ابعاد دیگر سازه است، مسأله را می توان در وضعیت کرنش مستوی تحلیل نمود. این کار به استثنای محدوده بسیار کوچکی در ابتدا و انتهای تونل، جواب قابل قبولی خواهد داشت.

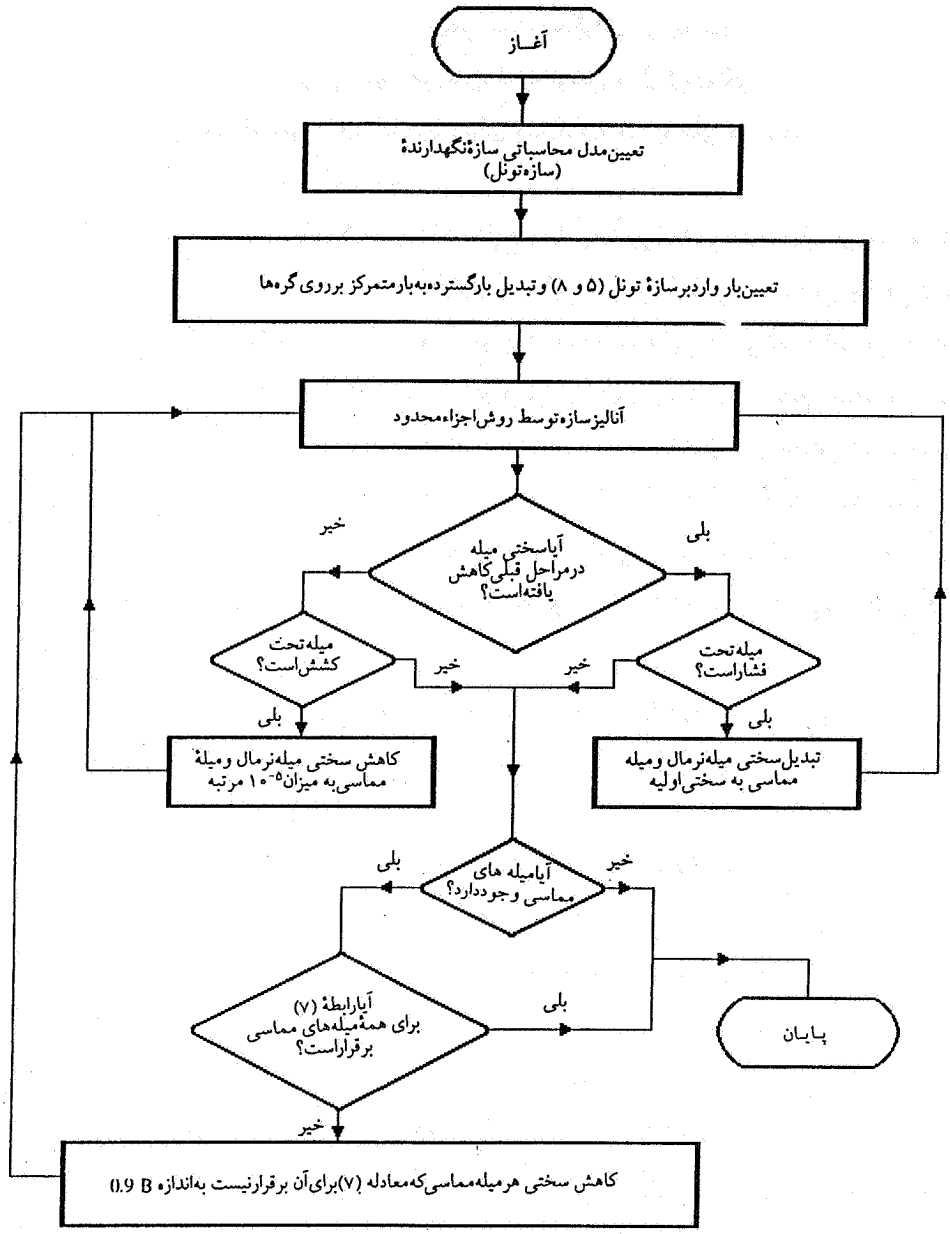
الگوریتم پیشنهادی

مراحل اصلی الگوریتم پیشنهادی روش اجزاء محدود برای تحلیل محافظ تونلها با رعایت رفتار حقیقی از جمله عمل یکطرفهٔ محیط و محدودیت مقاومت برشی در محل تماس محافظ و محیط در شکل ۲ ارائه شده است.

کمیتهای فیزیکی و هندسی مورد نیاز

نتایج حاصل از کاربرد مدل تکیه گاههای میله ای (که مشخصه های آن بر اساس نظریه وینکلر محاسبه می شود) با استفاده از روش اجزاء محدود (که از دقت بالایی برخوردار است) به طورطبیعی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]



شکل ۲ - فلوچارت الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل محافظ تونلها

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

به حل واقعی بسیار نزدیک خواهد بود. بدیهی است همگرایی در جواب نهایی بستگی به انتخاب صحیح نوع و تعداد المانها دارد. پیشنهاد می شود که به منظور مدل کردن تکیه گاهها از المان میله ای استفاده شود و المان خمشی بدون اثر برش برای مدل‌کردن جداره های کم ضخامت، المان کردن جداره های با ضخامت زیاد انتخاب شود.

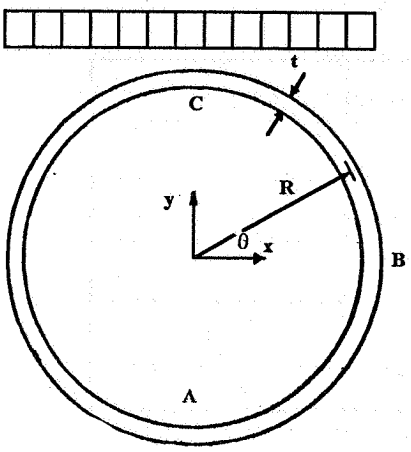
از آنجاکه تعداد المانهای تکیه گاهی بر دقت نتایج محاسبه تأثیر اساسی دارد، درابتدای حل مسأله لازم است تأثیر تعداد المانها بر کمیتهای مورد نیاز در تحلیل سازه محافظ بررسی شده و حداقل تعداد المانهایی که باید در محاسبات منظور شوند تعیین گردد. کمیت هایی که اثر تعداد اجزاء روی آنها بررسی شده است عبارتند از: لنگر خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی در مقطع محافظ و عکس العمل تکیه گاهها. برای هریک از کمیتهای فوق عوامل زیر نیز می تواند بر روی حداقل تعداد المانها موثر باشد: نسبت مدول الاستیسیتهٔ محیط به مدول الاستیسیتهٔ محافظ ، E/E_s، نسبت ضخامت مقطع محافظ به شعاع (ابعاد دهانه) تونل، t/R، و مقدار وچگونی توزیع باراعمال شده به محافظ. در تحلیل محافظ تونل در هر مورد می توان با توجه به عوامل ذکر شده تعداد مناسب المانهای لازم برای حل مسأله را تعیین نمود.

لازم به تذکر است که به منظور استفادهٔ گسترده تر و سریعتر از این روش و بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ یک برنامهٔ کامپیوتری به زبان فرترن و چند برنامهٔ کامپیوتری کمکی دیگر به زبان بیسیک نوشته شده است.

به منظور بررسی تأثیرتعداداجزاء بر مقدار نیروها و لنگرها، مقطع محافظ شکل ۳ با تعداد متفاوتی ازالمانها حل و نتایج محاسبات با یکدیگرمقایسه شده است. در تحلیل این مقطع، میله های کششی حذف شده و از المان خمشی بدون اثر برش استفاده شده است. مسأله در حالت کرنش مستوی و برای واحد طول تونل (متر) و با مشخصات داده شده در شکل ۳ وبا صرف نظر کردن از وجود اصطکاک و چسبندگی بین محیط و محافظ حل شده است.

منحنیهای شکل۴ (الف، ب، ج و د) نتایج‌به‌دست‌آمده‌برای تعدادمتفاوت المانها (۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸، ... و ۴۸) رابرای کمیتهای لنگرخمشی، نیروی محوری، نیروی برشی و عکس العمل تکیه گاهها در نقاط A، B و C نشان می دهند. به طوری که دراین منحنیها مشاهده می شود، برای بیشتر از ۴۰ المان تکیه گاهی ، تفاوت محسوسی در جواب کمیت مورد بررسی ملاحظه نمی شود.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]



$P = 100\ Kg/cm^2$

$E_s = 2\times10^5\ Kg/cm^2$

$E/E_s = 0.1$

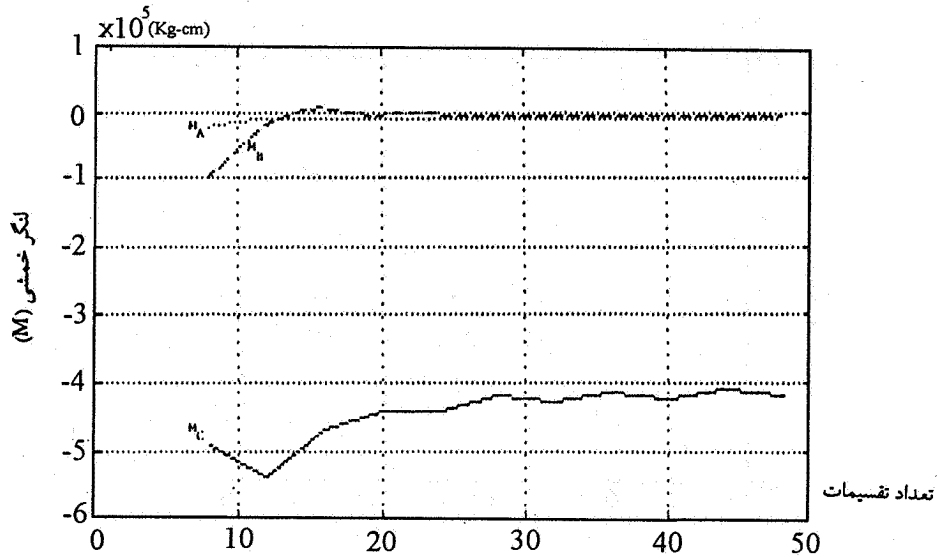
$\nu = \nu_s = 0.25$

$I_s = 130208.3\ cm^4$

$R = 500\ cm$

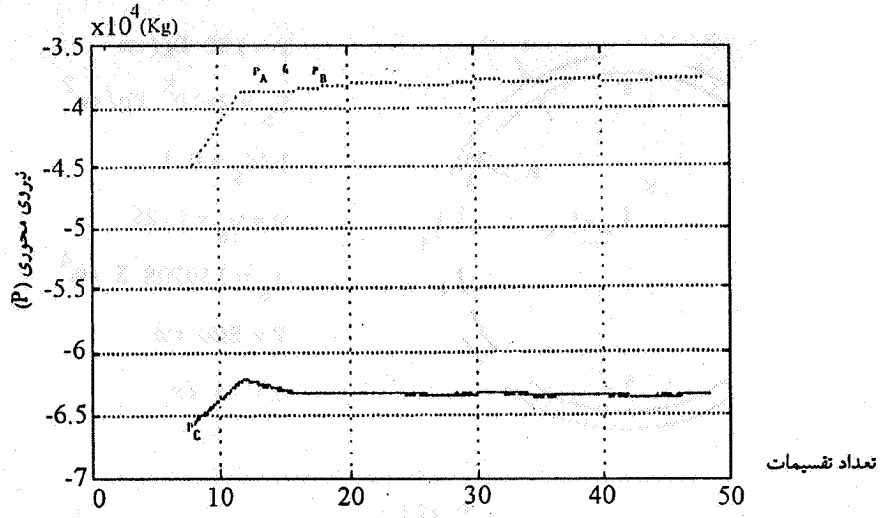
$t = 25\ cm$

شکل ۳

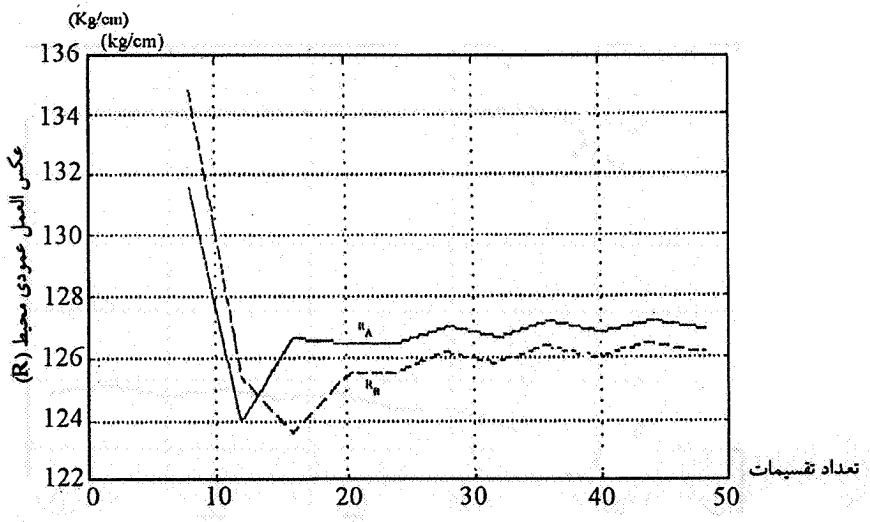


شکل (۴-الف)- مقایسه‌لنگرخمشی‌نقاط A،B و C محافظ تونل شکل ۳ برای تعدادمتفاوت‌المانها

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

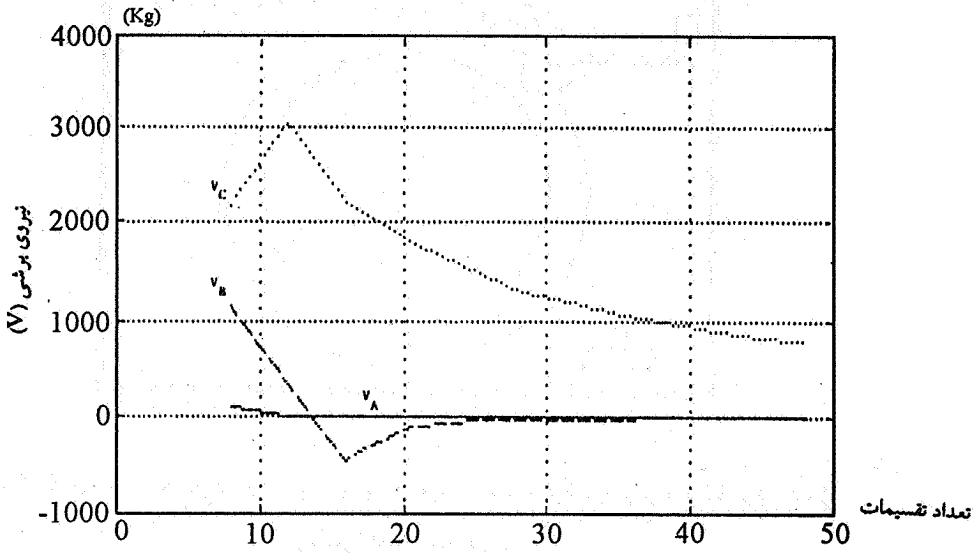


شکل (۴- ب)- مقایسه‌نیروی محوری‌نقاط A ، B و C محافظ‌تونل شکل ۳برای تعدادمتفاوت‌المانها



شکل (۴- ج)- مقایسه‌عکس‌العمل‌عمودی‌نقاط A و B محافظ تونل شکل ۳ برای تعداد متفاوت‌المانها

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

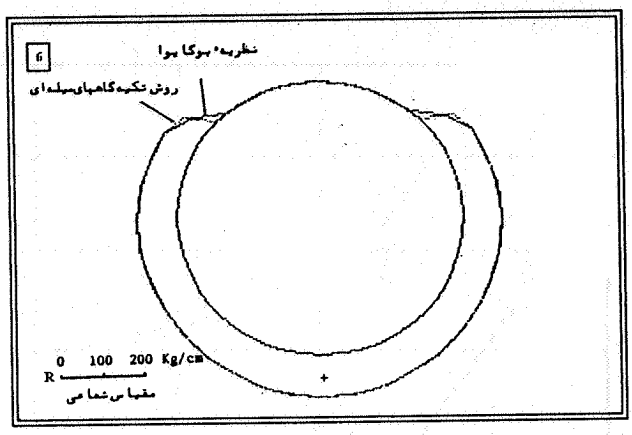


شکل (۴-د)- مقایسه نیروی برشی نقاط A، B و C محافظ تونل شکل ۳ برای تعداد متفاوت‌المانها

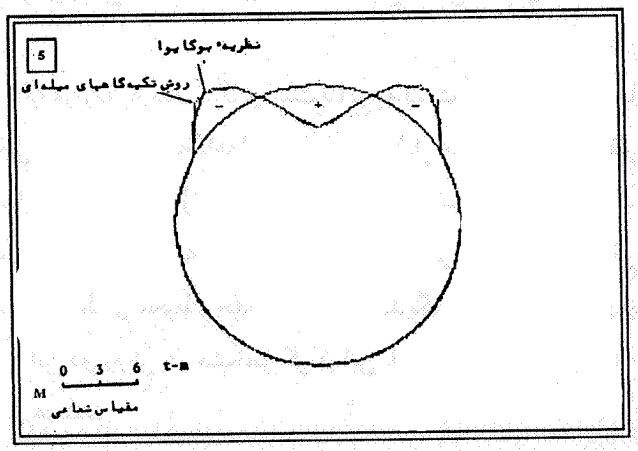
در منحنیهای شکل ۵ که مربوط به مثال دیگری است نتایج به دست آمده از تحلیل محافظ تونل با مقطعی به صورت شکل ۳ به روش تکیه گاههای میله ای (تحلیل حاضر) با نتایج نظریهٔ بوگایوا برای همان شکل مقایسه شده است [۲]. چنانچه مشاهده می شود برای دیاگرام لنگر خمشی محافظ و عکس العمل عمودی محیط به محافظ، مقادیر عددی هر یک از منحنیها فوق در نقطهٔ شروع ناحیهٔ جدا شدن محافظ از محیط، حداکثر ۵٪ با یکدیگر اختلاف دارند و این به دلیل تفاوتهایی است که بین این دو روش در مشخص کردن این نقطه وجود دارد. در بقیهٔ نقاط نتایج تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند.

در آخرین مثال مقطع محافظ شکل ۶ با نسبتهای مختلف مدول الاستیسیتهٔ محیط به مدول الاستیسیتهٔ محافظ، E/E_s، بدون حذف میله های کششی و با استفاده از المان خمشی بدون درنظر گرفتن اثر برش برای المانهای محافظ تحلیل شده است. مسأله در حالت کرنش مستوی و برای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]



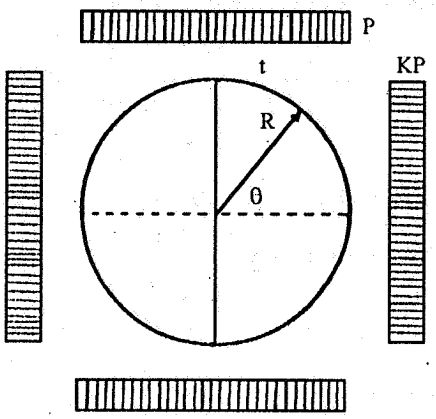
شکل (۵-الف)- مقایسه نتایج روش میله ای با ۴۸ میله و نظریه بوگایوا برای محافظ تونل شکل ۳
(عکس العمل عمودی)



شکل (۵- ب)- مقایسه نتایج روش میله ای با ۴۸ میله و نظریه بوگایوا برای محافظ تونل شکل ۳
(لنگر خمشی)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

واحد طول تونل و با مشخصات داده شده در شکل ۶ حل شده و نتایج بدست آمده از این تحلیل با نتایج نظریهٔ اینشتین - شوارتز در منحنیهای شکل ۷ مقایسه شده اند [۴]. چنانچه از منحنیهای نیروی محوری، لنگر خمشی و تغییر مکان شعاعی محافظ در نقطهٔ $\theta = 0$ برای نسبتهای مختلف E/E_s برای هر دور روش ملاحظه می شود، نتایج تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند. (حداکثر اختلاف در مورد تغییر مکان شعاعی است که حدوداً ۷٪ است)



P = 100 Kg/cm

K = 0.5

t = 25 cm

$E/E_s = 0.1$

R = 500 cm

$A = 2500\ cm^2$

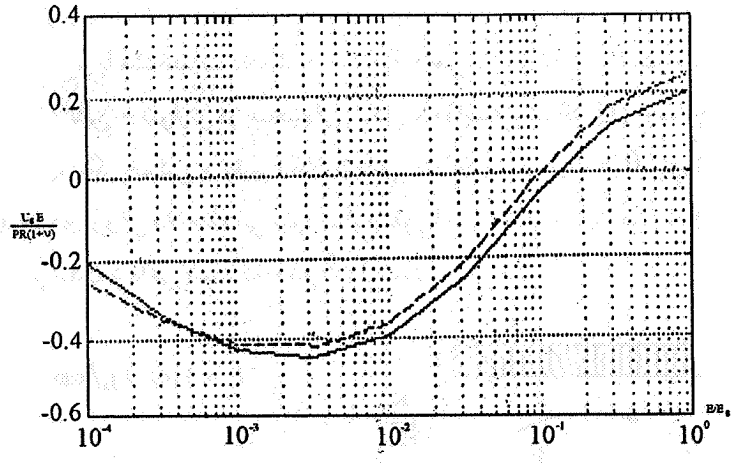
$I = 130802.83\ cm^4$

شکل ۶

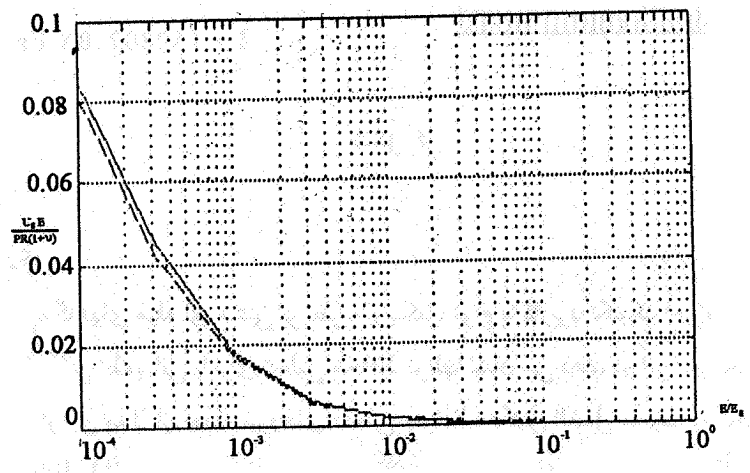
نتیجه گیری

مدل تکیه گاههای میله ای مبتنی بر نظریه وینکلر، توأم با کاربرد تکنیک اجزاء محدود، روش دقیق و بسیار قابل اطمینانی را برای تحلیل محافظ تونلها نشان می دهد. در این کار تحقیقاتی نتایج بدست آمده از این مدل از جمله نیروهای داخلی محافظ، عکس العمل محیط به محافظ و تغییر شکلهای محافظ با نظریه ها و روشهای دیگر مقایسه شده و صحت جوابها مورد تأیید قرار گرفته است. به نظر می رسد کاربرد این روش مزایای تئوریهای دقیق و انعطاف پذیری روشهای عددی را تواماً داراست. به ویژه اینکه می توان به کمک آن هر گونه اندرکنش سازهٔ محافظ و خاک را با سهولت

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]



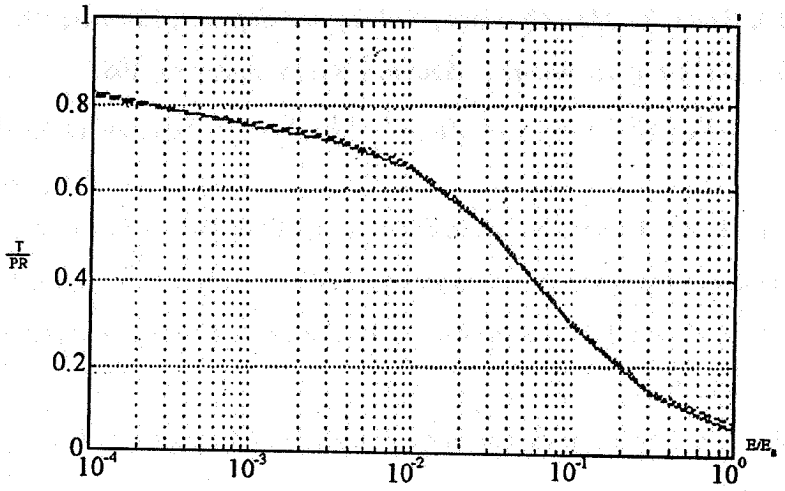
شکل (۷-الف)- جابجائی شعاعی در $\theta = 0$ محافظ تونل شکل ۶ و مقایسه بین مدل میله ای (خط چین) و نظریه اینشتین - شوارتز (خط پر)



شکل (۷- ب)- لنگر خمشی در $\theta = 0$ محافظ تونل شکل ۶ و مقایسه بین مدل میله ای (خط چین) و نظریه اینشتین - شوارتز (خط پر)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

و دقت در نظر گرفت و نیز می توان محافظ تونلهایی با مقاطعی به شکلهای مختلف وتحت بارگذاریهای متفاوت را صرف نظر از مصالح و ابعاد مقطع محافظ تحلیل کرد. بدیهی است تحلیل و طرح محافظ تونلها نیاز به مطالعات و تحقیقات بیشتری دارد.



شکل (۷-ج)- نیروی محوری در $\theta = 0$ محافظ تونل شکل ۶ و مقایسه بین مدل میله ای (خط چین) و نظریه اینشتین - شوارتز (خط پر)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]

مراجع

1. Aldorf, J.& Exner, K., *Mine Openings , Stability and Support* , Elsevier, 1986.

2. Szechy, K., *The Art of Tunnelling* , Akadimiai Kiado, Budapest, 1967.

۳ـ انستیتوی ئیدروپرایکت - مسکو، *طراحی تونلهای آبی*، ترجمه شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس، ۱۳۶۶.

4. Einstein, H.H. & Schwartz, W., "Simplified Analysis for Tunnel Supports", . ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering,* Vol. 105, No. GT4, April,1979.

5. Bathe, K.J. & Wilson, E.L., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice - Hall, 1976.

6. Brown, E.T., *Analytical and Computational Methods in Engineering Mechanics*, London, 1987.

۷ـ اسلیمی، حمیدرضا، *تحلیل محافظ تونلها بر اساس نظریه وینکلرومدل تکیه گاههای میله ای به روش اجزاء محدود*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۶۹.

۸ـ امین پور، علی، *روشهای بارگذاری و طراحی سازه های زیرزمینی*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ۱۳۶۵.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1372.13.1.6.8]