

شبیه‌سازی نشست سطح زمین در معادن لایه‌ای شیب دار با استفاده از روش المان مرزی نایبوستگی در جابه جایی

علی دباغ^{۱*}، محمد فاتحی مرجی^۲، حبیب ا... فرقانی^۳

۱- مربی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد؛ شماره تماس: ۰۳۵۱-۸۲۱۱۶۷۰-۹؛ adabagh@yazduni.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد؛ mfatehi@yazduni.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت ۱۵ بهمن ۱۳۸۶، پذیرش ۱۷ مرداد ۱۳۸۸)

چکیده

پدیده نشست یکی از پیامدهای اجتناب ناپذیر معدن کاری زیرزمینی می‌باشد که به طور ویژه در روش‌های جبهه کار بلند (در روش‌های با پر کردن و به طور خاص در روش‌های بدون پر کردن و مکانیزه) و نیز اتاق و پایه (با بازیابی پایه یا بدون بازیابی پایه) اتفاق می‌افتد. این پدیده باعث بروز یک سری جابه جایی‌های افقی و قائم روی سطح زمین می‌شود که این جابه جایی‌ها نیز پیامدهایی را به دنبال دارند و بعضاً باعث بروز خرابی‌ها و متعاقب آن خسارت‌های مالی و جانی جبران ناپذیر می‌گردند. در این مقاله با استفاده از روش نایبوستگی جابه جایی مرتبه بالا (از زیر مجموعه روش‌های المان مرزی) و روش تفاضل محدود پدیده نشست و جابه جایی‌های متناظر آن مدل می‌شوند و می‌توان نشست زمین و کرنش‌های افقی متناظر آن را، هم در مورد لایه‌های افقی و هم در مورد لایه‌های شیب دار بررسی نمود. نتایج به دست آمده در مقایسه با روش‌های تجربی هم خوانی مناسبی داشتند.

کلمات کلیدی

نشست زمین، روش المان مرزی، روش تفاضل محدود، نایبوستگی، جابه جایی با مرتبه بالا، جابه جایی‌های افقی و قائم

۱- مقدمه

لوله، خرابی کابل‌های برق، شکستگی سطح جاده یا هر مورد دیگری را نیز می‌تواند به وجود آورد. کرنش‌های افقی سطحی باعث بیشترین خسارت بر ساختمان‌ها یا تأسیسات واقع در بالای مناطق معدنکاری می‌شوند. کرنش‌های کششی ممکن است شکستگی یا ترک ایجاد نمایند.

۲- روش‌های تخمین نشست

روش‌های تخمین نشست شامل دو دسته اصلی است که عبارتند از روش‌های تجربی و روش‌های پدیده شناختی [۲].

۲-۱- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی مناسب برای توصیف نشست در معادن زیرزمینی شامل موارد زیر است:

الف- روش‌های گرافیکی^۵

این روش ساده شامل نشان دادن اطلاعات به شکل گرافیکی بر روی نگارنما در جاهایی که نشست صورت گرفته است، می‌باشد. مقدار و جهت پارامترها ممکن است برای یک معدن خاص به درستی به دست آیند. این روش برای مکان‌هایی که جزئیات نشست مشابه داشته باشند و اختلاف ناچیزی از لحاظ زمین‌شناسی با یکدیگر داشته باشند قابل تبدیل است. این روش تاکنون بیشتر در انگلستان به کار رفته است [۲] و [۳].

ب- روش معادلات توابع مقطعی^۶

این روش شامل مشتق ریاضی توابعی است که برای طرح یک مقطع کامل نشست در سطح زمین استفاده می‌شود. تفاوت این مسئله با روش پدیده شناختی (که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد) در این است که اندازه‌های بکار رفته در توابع مقطعی، مشتق‌های تجربی از اطلاعات مشاهده شده است. این روش به سرعت در حالت‌هایی که مشخصات لایه‌ها مشابه نباشند به کار گرفته می‌شود و با تغییر پارامترها می‌توان نمونه‌های متفاوتی را حل کرد.

معادلات مقطعی در بعضی از کشورها نظیر لهستان، مجارستان، اتحاد جماهیر شوروی سابق و اخیراً در ایالات متحده آمریکا کاربرد مناسبی دارد.

ج- روش معادلات توابع تاثیر داخلی^۷

مبنای توصیف نشست بر اساس المان‌های کوچک از ناحیه استخراجی می‌باشد. نشست در هر نقطه از سطح با جمع داخلی المان‌های استخراجی بر مبنای انطباق^۸ محاسبه می‌گردد. بر خلاف معادلات توابع مقطعی، معادلات توابع داخلی به طور

در هر کجا که بر اثر استخراج کانسنگ یا به هر دلیل دیگری حفره‌ای در دل زمین ایجاد شود، نحوه تمرکز تنش در ساختمان‌های زمین‌شناسی اطراف منطقه خالی شده، تغییر می‌کند. با گذشت زمان لایه‌ها یا ساختارهای بالای فضای استخراج شده ریزش کرده، این تخریب بر لایه‌های بالایی اثر می‌گذارد و نشانه‌های آن که به صورت تخریب یا فرو نشستن سطح زمین است خود را نمایان می‌سازند. این کار به طور متداول به عنوان نشست در معادن شناخته می‌شود. بنابراین "نشست در معدن" می‌تواند به عنوان تغییرات ساختار زمین تعریف شود که به علت فروپاشی لایه‌ها یا ساختارهای بالایی در فضای خالی معدن صورت می‌گیرد.

به طور کلی نشست در سطح زمین به دو صورت پیوسته و غیر پیوسته اتفاق می‌افتد. نشست غیر پیوسته بیشتر در معادن غیر لایه‌ای یا لایه‌ای با ضخامت زیاد و نشست پیوسته عمدتاً در معادن لایه‌ای یا معادن ذغال سنگ رخ می‌دهند.

بحث اصلی در این مقاله نشست پیوسته می‌باشد. با بررسی‌های به عمل آمده روش‌های تجربی زیادی برای محاسبات نشست بر روی لایه‌های افقی صورت گرفته که می‌توان به منابع [۱]، [۲] و [۳] مراجعه کرد. ولی برای لایه‌های شیبدار این مسئله کمتر مورد توجه قرار گرفته و دستورالعمل‌های تجربی برای رسم توزیع کرنش‌های افقی که در سطح زمین رخ می‌دهد به خوبی بیان نگردیده است. شایان ذکر است عامل اصلی تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات سطحی کرنش‌های کششی و فشاری می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر این مسئله برای لایه‌های شیبدار مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشست شامل ۵ جزء اصلی است که باعث تخریب ساختارهای سطحی و منابع قابل تجدید می‌شود [۱]:

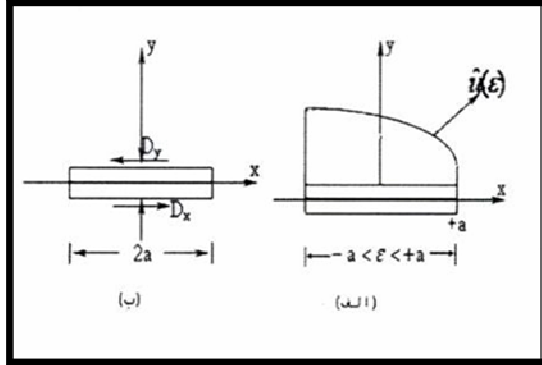
- جابه‌جایی قائم (ته نشینی یا نشست^۱، فرو رفتن^۲، پایین کشیدن^۳).
- جابه‌جایی افقی (حرکت جانبی).
- جابه‌جایی شیبی (ترکیب جابه‌جایی افقی و قائم).
- کرنش افقی (تغییر شکل افقی در واحد طول افقی)
- انحراف عمودی^۴ که می‌تواند با توجه به شیب به وجود آمده و مؤلفه جابه‌جایی قائم نسبت به افق تخمین زده شود.

جابه‌جایی‌های قائم به تنهایی خسارت کمی به تأسیسات سطحی وارد می‌کنند. جابه‌جایی افقی در سطح زمین نیز ممکن است خسارت کمی به جا گذارد اما شکستگی در خطوط

$$D_i = u_i(x, 0_-) - u_i(x, 0_+) \quad (1)$$

در این رابطه D_i ناپیوستگی جابه‌جایی و u_i مولفه‌های جابه‌جایی در راستاهای X و Y می‌باشند.

شکل ۱ ناپیوستگی در جابه‌جایی و پخش آن در طول المان و نیز جهت مثبت ناپیوستگی در جابه‌جایی‌ها را برای یک المان با فرض ثابت بودن این ناپیوستگی‌ها در طول آن المان نشان می‌دهد.



شکل ۱: ناپیوستگی جابه‌جایی (الف) ناپیوستگی جابه‌جایی ثابت در طول المان (ب) المان ناپیوستگی جابه‌جایی کلی $u(\epsilon)$

اگر پخش ناپیوستگی در جابه‌جایی‌ها در طول المان ثابت نباشد و بطور خطی یا سهمی تغییر کند آن گاه المان فوق را المان با مرتبه بالا دانسته و از روابط زیر برای محاسبه ناپیوستگی در جابه‌جایی‌ها در طول آن استفاده می‌شود [۶] و [۷].

برای المان‌های خطی

$$D_i(\epsilon) = N_1(\epsilon)D_i^1 + N_2(\epsilon)D_i^2, \quad i = x, y \quad (2)$$

و برای المان‌های سهمی

$$D_i(\epsilon) = N_1(\epsilon)D_i^1 + N_2(\epsilon)D_i^2 + N_3(\epsilon)D_i^3 \quad (3)$$

$$i = x, y$$

که در آن‌ها توابع شکل $N_1(\epsilon)$ ، $N_2(\epsilon)$ و $N_3(\epsilon)$ به ترتیب برای المان‌های خطی و سهمی به صورت معادلات ۴ و ۵ است.

$$N_1(\epsilon) = -\frac{\epsilon - a_2}{a_1 + a_2}, \quad N_2(\epsilon) = \frac{\epsilon - a_1}{a_1 + a_2} \quad (4)$$

$$N_1(\epsilon) = \frac{\epsilon(\epsilon - a_2 - a_3)}{[(a_1 + a_2)(a_1 + 2a_2 + a_3)]}$$

$$N_2(\epsilon) = \frac{-(\epsilon + a_1 + a_2)(\epsilon - a_2 - a_3)}{[(a_2 + a_3)(a_2 + a_3)]} \quad (5)$$

مستقیم‌اندازه‌گیری را انجام نمی‌دهند و به علاوه در این روش سنگ‌های در برگیرنده بالایی کاملاً هموزن و یزوتروپ فرض می‌شوند که محدودیتی را بر کار اعمال می‌کنند. به طور معمول معادلات داخلی برای توصیف نشست‌های مربوط به کارهای زیرزمینی نامنظم با ژئومتری (هندسه) پیچیده است. این روش در بعضی از نقاط اروپا به طور محدود استفاده می‌شود.

۲-۲- روش شناخت پدیده^۹

روش پدیده شناختی شامل مدل‌سازی لایه‌های زمین بر مبنای معادلات ریاضی و استفاده از قوانین مکانیک پیوسته است. در چنین حالتی از پیچیدگی شرایط چینه‌شناسی لایه‌ها صرف نظر گردیده و پارامترها برای حل مسائل ریاضی ساده شده‌اند. مبنای استفاده از این روش، اصول مکانیک پیوسته و با فرض نیمه الاستیک، ویسکوالاستیک، پلاستیک و الاستو-پلاستیک می‌باشد.

فقط مدل‌های الاستوپلاستیک به طور موفقیت آمیز در آمریکا بکار گرفته شده‌اند.

در اینجا از روش المان مرزی ناپیوستگی در جابه‌جایی با مرتبه بالا برای مدل‌سازی نشست زمین استفاده شده است.

۳- روش ناپیوستگی در جابه‌جایی با مرتبه بالا

خیلی از مسائل عملی در مکانیک جامدات مربوط به اجسام، ترک‌ها یا باز شدگی‌های چاک مانند و نازک است. یک ترک دارای دو سطح یا مرز است که به طور موثر بر هم منطبق هستند. روش تنش موهومی برای این گونه مسائل مورد بررسی قرار می‌گیرد. زیرا اثر المان‌هایی که در طول یک سطح ترک قرار گرفته‌اند غیر قابل تشخیص از اثر المان‌هایی است که در طول سطح دیگر ترک واقع شده‌اند. با این وجود روش دیگری از المان مرزی می‌تواند از عهده این گونه مسائل برآید. این روش، روش ناپیوستگی جابه‌جایی است که بر اساس راه حل تحلیلی در مورد مسئله یک ناپیوستگی ثابت در جابه‌جایی روی یک قطعه خطی محدود در صفحه XY از یک جسم جامد الاستیک نامحدود ارائه شده است [۴].

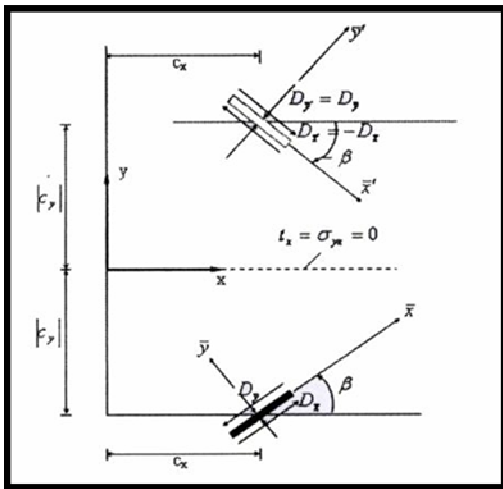
این روش یکی از روش‌های المان مرزی غیر مستقیم می‌باشد که در آن تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در روی مرز مسئله و در داخل جسم بر حسب ناپیوستگی در جابه‌جایی‌های محاسبه شده برای هر المان در طول مرز مسئله محاسبه می‌شوند. ناپیوستگی در جابه‌جایی برای هر المان که یک ترک خطی با طول $2a$ در نظر گرفته می‌شود به صورت زیر تعریف شده است [۵]:

$$F(x, y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \sum_{i=1}^3 D_i^j F_j(I_0, I_1, I_2) \quad i = x, y \quad (8)$$

مسائل نیم صفحه نیز بر اساس روش ناپیوستگی در جابه‌جایی قابل حل می‌باشند (شکل ۳) و در آن تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها به صورت زیر خواهند بود [۴]:

$$u_i = u_i^A + u_i^I + u_i^S, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^A + \sigma_{ij}^I + \sigma_{ij}^S \quad (9)$$

که در آن‌ها از بالا نویس A برای کمیت‌های واقعی، بالانویس I برای کمیت‌های تصویری و بالانویس S برای کمیت‌های تکمیلی در راه حل تصویری ارائه شده در منبع شماره [۳] استفاده شده است.



شکل ۳: روش تصویری و سیستم‌های مختصات مربوط به آن، برای حل مسائل نیم صفحه (سطح آزاد نیم صفحه فاقد تنش است)

با توجه به شرایط مرزی مسائل مختلف و با استفاده از روابط بالا و تقسیم کردن مرزهای مسئله مورد نظر به تعداد المان‌های کافی، در نهایت روابط کلی زیر حاصل می‌شوند:

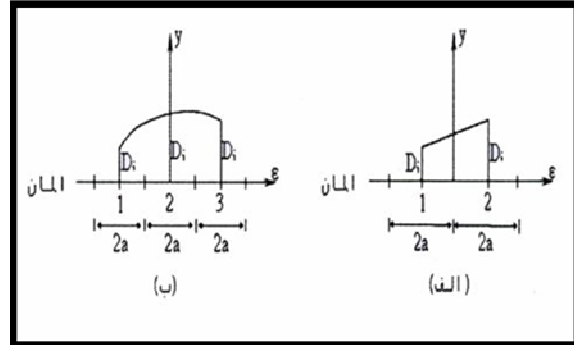
$$b_s^i = \sum_{j=1}^N C_{ss}(i, j) D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}(i, j) D_n^j, \quad i = 1 \text{ to } N$$

$$b_n^i = \sum_{j=1}^N C_{ns}(i, j) D_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}(i, j) D_n^j, \quad i = 1 \text{ to } N \quad (10)$$

که در آن‌ها مقادیر b_n^i و b_s^i معرف مقادیر معلوم جابه‌جایی‌ها و یا تنش‌های برشی و قائم مربوط به المان‌های مرزی هستند (که بر اساس شرایط مرزی مسئله مورد نظر قابل تعیین می‌باشند و ماتریس‌های $C_{ss}(i, j)$ و غیره بیانگر

$$N_3(\varepsilon) = \frac{\varepsilon(\varepsilon + a_2 + a_3)}{[(a_2 + a_3)(a_1 + 2a_2 + a_3)]}$$

در شکل ۲ از دسته المان‌های دو تایی برای حالت خطی و از دسته المان‌های سه تایی برای حالت سهمی استفاده شده است [۶] و [۷]. طول المان‌ها در هر دسته المان با هم مساوی در نظر گرفته شده است (یعنی $a_1 = a_2, a_2 = a_3$) [۷].



شکل ۲: ناپیوستگی جابه‌جایی برای المان‌های خطی (ب) المان‌های سهمی

۳-۱- آنالیز تنش و جابه‌جایی

آنالیز تنش و جابه‌جایی در مکانیک جامدات با استفاده از روش عددی ناپیوستگی در جابه‌جایی در سال ۱۹۷۶ ارائه شد [۸]. در اینجا نیز به صورت خلاصه به ترتیب روابط مربوط به جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها برحسب ناپیوستگی جابه‌جایی‌ها در صفحه X و Y و برای حالت کرنش صفحه‌ای و در یک محیط ایزوتروپیک با رفتار الاستیک خطی، به صورت زیر ارائه می‌شود [۲].

$$u_x = [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + [-(1-2\nu)g_{,x} - yg_{,xy}]$$

$$u_y = [(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + [2(1-\nu)g_{,y} - yg_{,yy}] \quad (6)$$

و تنش‌ها عبارتند از:

$$\sigma_{xx} = 2G[2f_{,xy} + yf_{,xyy}] + 2G[g_{,yy} + yg_{,yyy}]$$

$$\sigma_{yy} = 2G[-yf_{,xyy}] + 2G[g_{,yy} - yg_{,yyy}] \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = 2G[2f_{,yy} + yf_{,yyy}] + 2G[-yg_{,xyy}]$$

که در آن‌ها G مدول برشی $f_{,x}, f_{,y}, g_{,x}, g_{,y}$ و غیره مشتق‌های جزئی توابع هارمونی $f(x, y)$ و $g(x, y)$ برحسب X و Y می‌باشند. این توابع را می‌توان برای المان‌های سهمی برحسب تابع مشترک زیر نوشت [۶] و [۷]:

ترک اندازه‌گیری می‌کند. بنابر این مشتقات مورد نیاز باید از فرمول‌های متفاوت عددی محاسبه شوند. یک نمونه از این موردها برای مسئله‌ای ارائه می‌شود. باید توجه داشت که ناپیوستگی در تنش مماسی در طول هر دو ترک را می‌توان چنین نوشت:

$$\sigma_{xx}^- - \sigma_{yy}^+ = \frac{2G}{1-\nu} \left(\frac{\partial u_x^-}{\partial x} - \frac{\partial u_x^+}{\partial x} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_{xx}^- - \sigma_{yy}^+ = \frac{2G}{1-\nu} \frac{\partial}{\partial x} (u_x^- - u_x^+)$$

کمیت $u_x^- - u_x^+$ مؤلفه برشی ناپیوستگی جابه‌جایی در هر نقطه از طول ترک‌ها می‌باشد. مشتق مماسی این کمیت، مقدار ناپیوستگی در تنش مماسی را اندازه‌گیری می‌کند [۴].

به منظور یافتن تنش‌های مماسی σ_{xx}^+ و σ_{xx}^- در

المان x ترک، باید مشتقات $\frac{\partial u_x^-}{\partial x}$ و $\frac{\partial u_x^+}{\partial x}$ را در این المان به‌دست آورد. این امر توسط تقریب‌های تفاضل محدود استاندارد صورت می‌گیرد. با در نظر گرفتن $f(x)$ برای u_x^+ و u_x^- ، سه فرمول تفاضل محدود جداگانه برای $\frac{\partial f(x)}{\partial x}$ در نقطه $x = x^i$ بدین صورت است [۴]:

معادله تفاضل جلو

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x^i} = \frac{f(x^{i+1}) - f(x^i)}{x^{i+1} - x^i}$$

معادله تفاضل عقب

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x^i} = \frac{f(x^i) - f(x^{i-1})}{x^i - x^{i-1}} \quad (16)$$

معادله تفاضل مرکز

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x^i} = \frac{f(x^{i+1}) - f(x^{i-1})}{x^{i+1} - x^{i-1}}$$

فرمول‌های تفاضل جلو و عقب برای اولین و آخرین المان‌های ترک مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرمول تفاضل مرکزی برای همه المان‌های دیگر استفاده دارد [۴].

سر انجام با استفاده از یک روش عددی مناسب و یک الگوریتم ساده و کلاسیک می‌توان ابتدا ناپیوستگی در جابه‌جایی‌ها را بر روی مرزهای مسئله و برای همه المان‌های مرزی محاسبه کرد و سپس برحسب آن‌ها ناپیوستگی

ضرایب تاثیر این المان‌ها نسبت به همدیگر به ترتیب در سیستم‌های مختصات محلی قائم n و برشی s می‌باشند [۶]. مقدار ناپیوستگی در تنش مماسی در هر نقطه از طول ترک متناسب با مشتق مماسی مؤلفه برشی ناپیوستگی جابه‌جایی در این نقطه است. این نتیجه به آسانی توسط قانون هوک برای حالت کرنش صفحه‌ای اثبات می‌شود. ابتدا دو معادله را چنین می‌توان نوشت [۴]:

$$\sigma_{xx} = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)e_{xx} + \nu e_{yy}] \quad (11)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{2G}{1-2\nu} [\nu e_{xx} + (1-\nu)e_{yy}]$$

سپس با حل دومین معادله نسبت به e_{yy} و جاگذاری آن در معادله اول رابطه شماره ۱۲ به دست می‌آید.

$$\sigma_{xx} = \frac{2G}{1-\nu} e_{xx} + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy} \quad (12)$$

این روابط معادلات مناسب برای محاسبه تنش مماسی در طول ترک هستند. برای دو طرف مثبت و منفی ترک چنین می‌توان نوشت:

$$\sigma_{xx}^+ = \frac{2G}{1-\nu} e_{xx}^+ + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy}^+ \quad (13)$$

$$\sigma_{xx}^- = \frac{2G}{1-\nu} e_{xx}^- + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy}^-$$

با استفاده از تعاریف $e_{xx}^- = \frac{\partial u_x^-}{\partial x}$ و $e_{xx}^+ = \frac{\partial u_x^+}{\partial x}$

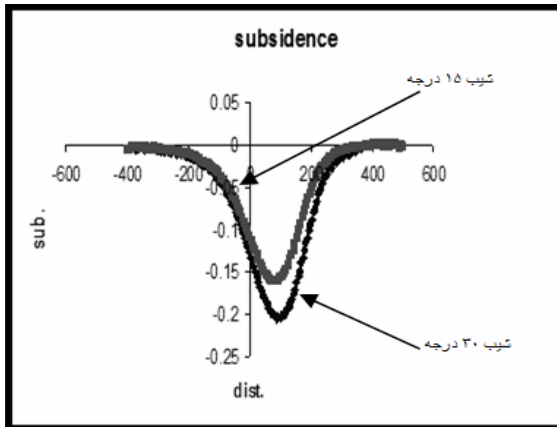
معادلات ۱۴ حاصل می‌شود:

$$\sigma_{xx}^+ = \frac{2G}{1-\nu} \frac{\partial u_x^+}{\partial x} + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy}^+ \quad (14)$$

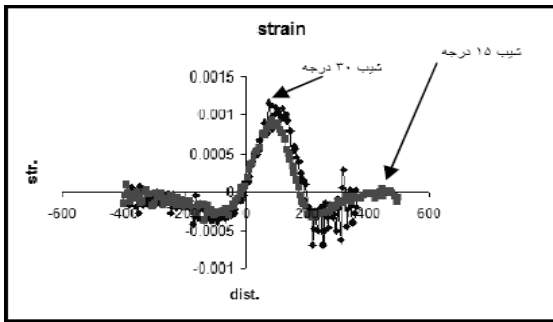
$$\sigma_{xx}^- = \frac{2G}{1-\nu} \frac{\partial u_x^-}{\partial x} + \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{yy}^-$$

معادلات بالا را می‌توان برای محاسبه تنش‌های مماسی در طول ترک‌ها استفاده کرد.

تنش‌های σ_{yy}^+ و σ_{yy}^- در تمام نقاط در طول ترک برابرند. از این مشتقات برای به دست آوردن مشتقات مماسی جابه‌جایی برشی u_x^- و u_x^+ استفاده می‌شود. روش ناپیوستگی جابه‌جایی این کمیت‌ها را در یک سری نقاط مجزا در طول



شکل ۴: نمودار نشست مربوط به شیب‌های متفاوت واحدها بر حسب متر



شکل ۵: نمودار کرنش مربوط به شیب‌های متفاوت واحد محور طولی بر حسب متر

۴-۱-۲- اثر عرض

در بررسی اثر عرض، ابتدا باید عرض بحرانی را تعریف کرد. عرض بحرانی به حالتی گفته می‌شود که نسبت عرض پانل به عمق لایه در آن حدود ۱/۴ باشد [۳] که مقدار دقیق آن با زاویه کشش حدی مشخص می‌شود. در حالت کمتر از عرض بحرانی نشست ناقص است و در حد بحرانی ماکزیمم نشست روی می‌دهد. در بیشتر از آن ماکزیمم نشست تغییر نمی‌کند زیرا عمق لایه ثابت است. در این حالت تنها محدوده نشست گسترده‌تر می‌شود.

به منظور بررسی بهتر این موضوع مشخصات دو لایه مشابه که از نظر عرض متفاوت هستند، بر اساس جدول ۲ و شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات دو لایه با عرض متفاوت

عمق	عرض	شیب	لایه
۱۰۰	۵۰۰	۳۰	۱
۱۰۰	۱۵۰	۳۰	۲

جابه‌جایی‌های مرزی و تنش‌ها را بر روی مرزها و در خارج از مرزها در داخل جسم مورد نظر به دست آورد. لازم به ذکر است که مولفه‌های کرنش را نیز می‌توان بر حسب این ناپیوستگی در جابه‌جایی‌ها و از طریق الگوریتم‌های خاص به دست آورد.

۴- حل چند مثال

بطور کلی، عمده پارامترهای موثر در نشست را می‌توان به سه دسته شامل پارامترهای هندسی، مشخصات لایه‌های سنگی در برگزیده و زمان تقسیم کرد. با توجه به این که مسئله مورد نظر براساس پارامترهای استاتیکی حل شده پارامتر زمان مد نظر قرار نگرفته است.

۴-۱- پارامترهای هندسی

پارامترهای مربوط به شکل، شامل ابعاد و چگونگی احداث فضای زیرزمینی، عرض فضا، ارتفاع فضا، روش استخراج (کامل یا ناقص)، روش کنترل سقف بعد از استخراج و عمقی که لایه وجود دارد، می‌باشد. در این مقاله پارامترهای شیب، عرض پانل و عمق بررسی می‌گردند. در کلیه مثال‌های حل شده به علت این که در روش‌های تجربی میزان نشست و کرنش ضریبی از ضخامت لایه می‌باشد، برابر واحد در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۱- اثر شیب

شیب لایه تقعر نشست را به سمت قسمت عمیق‌تر لایه منتقل می‌کند. حالت فوق برای اعماق کم درست نمی‌باشد زیرا در این اعماق قسمت فوقانی آنقدر کم عمق‌تر از قسمت دیگر است که مقدار بیشتری جابجایی در بالای آن صورت می‌گیرد. در حالیکه در اعماق زیاد اختلاف بین قسمت‌های فوقانی و تحتانی کمتر است.

در جدول ۱ مشخصات دو لایه مشابه با شیب‌های متفاوت درج شده است. منحنی توزیع نشست و کرنش این دو لایه در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

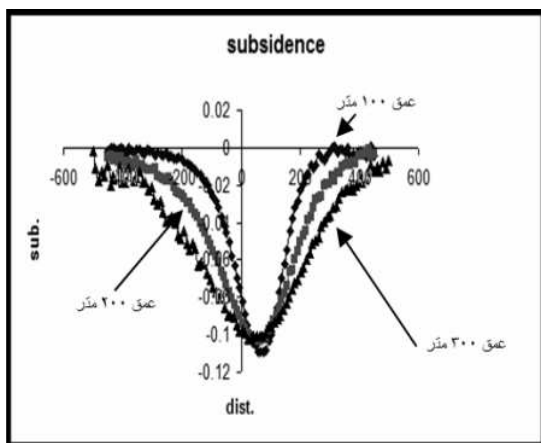
جدول ۱: مشخصات دو لایه با شیب متفاوت

عمق	عرض	شیب	لایه
۲۰۰	۲۰۰	۱۵	۱
۲۰۰	۲۰۰	۳۰	۲

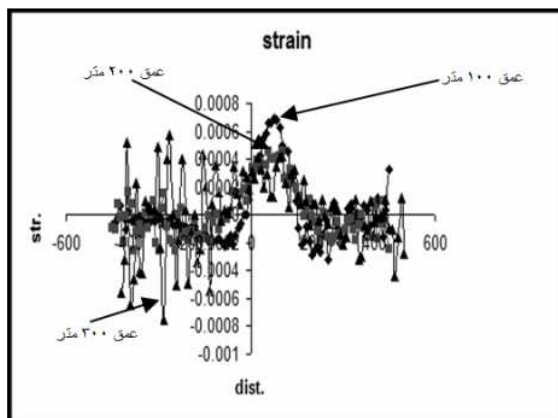
همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش شیب مقدار نشست و به تبع آن کرنش فشاری کم می‌گردد ولی در این مثال میزان کرنش‌های کششی تغییر چندانی ندارند.

جدول ۳: مشخصات سه لایه مشابه در عمق‌های مختلف

عمق	عرض	شیب	لایه
۱۰۰	۱۵۰	۱۵	۱
۲۰۰	۱۵۰	۱۵	۲
۳۰۰	۱۵۰	۱۵	۳



شکل ۸: نمودار نشست مربوط به سه لایه با عمق‌های متفاوت واحدها بر حسب متر



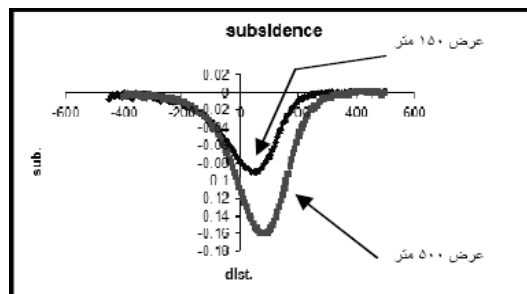
شکل ۹: نمودار کرنش مربوط به عمق‌های متفاوت واحد محور طولی بر حسب متر

در این مثال‌ها مدول یانگ سنگ در برگ‌برنده ۵ گیگا پاسکال و برای ذغال سنگ ۱ گیگا پاسکال و وزن مخصوص سنگ در برگ‌برنده ۲/۴۲ تن بر مترمکعب منظور شده است.

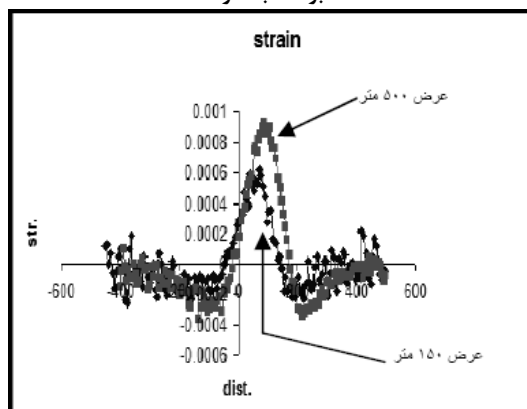
نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

الف- مشابه روش‌های تجربی، میزان نشست تقریباً با کسینوس زاویه شیب لایه نسبت مستقیم دارد.

ب- با افزایش عرض استخراج میزان نشست و کرنش‌ها افزایش می‌یابد. این مسئله تا رسیدن عرض به حد بحرانی ادامه دارد و بعد از آن میزان ماکزیمم کرنش‌ها و نشست ثابت باقی می‌ماند.



شکل ۶ نمودار نشست مربوط به عرض‌های متفاوت واحدها بر حسب متر



شکل ۷: نمودار کرنش مربوط به عرض‌های متفاوت واحد محور طولی بر حسب متر

چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش عرض میزان نشست و کرنش‌های کششی و فشاری افزایش می‌یابند. اما این افزایش تا زمانی که عرض استخراج به حد بحرانی نرسد ادامه دارد.

۴-۱-۳- اثر عمق

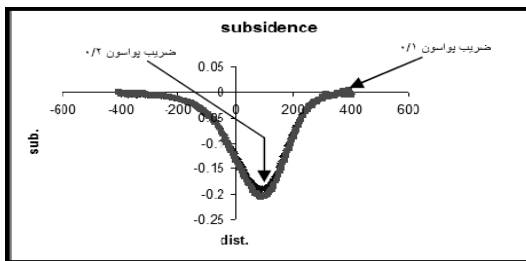
با افزایش عمق میزان نشست و سطح نشست یافته کاهش می‌یابد. علت آن است که با افزایش عمق، عرض بحرانی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش عرض بحرانی میزان نشست کم می‌شود. در صورتی که استخراج در عمق‌های متفاوت ولی با عرض‌های بحرانی صورت گیرد بر عکس حالت قبل پیش می‌آید. اثر عمق برای سه لایه مشابه در جدول ۳ و شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. مانند حالت‌های قبل کرنش فشاری کاملاً وابسته به میزان نشست است. برای کرنش‌های کششی مقدار آن تابع نسبت عرض به عمق است و تا زمانی که عرض استخراج به حد بحرانی نرسیده مقدار آن افزایش می‌یابد.

۴-۱-۴ ترکیب موارد بالا

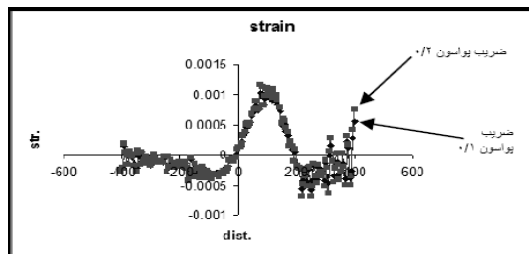
به منظور بررسی بهتر اثر ژئومتری لایه بر میزان نشست و کرنش برای شیب‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و عرض‌های ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر و عمق‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ متر مسئله حل گردید. نتایج آن در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: بررسی تغییرات میزان نشست و کرنش سطح زمین با تغییر پارامترهای ژئومتری لایه (مواردی که با - نشان داده شده اند یا قابل اندازه گیری نبوده اند یا جوابی غیر قابل قبول داشته اند)

ردیف	شیب (درجه)	عرض (متر)	عمق (متر)	ماکزیمم کرنش کششی در بالا شیب	ماکزیمم کرنش کششی در پایین شیب	ماکزیمم کرنش فشاری	ماکزیمم نشست نسبت به ضخامت لایه
۱	۳۰	۱۵۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸	۰/۲۸
۲	۳۰	۱۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۳
۳	۳۰	۱۵۰	۳۰۰	-	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵	۰/۲۵
۴	۳۰	۲۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۴	۰/۵
۵	۳۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۴	۰/۴۵
۶	۳۰	۲۰۰	۳۰۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۱۴	۰/۴۵
۷	۳۰	۲۵۰	۱۰۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۲	۰/۸
۸	۳۰	۲۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۶۵
۹	۳۰	۲۵۰	۳۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۷۲
۱۰	۴۵	۱۵۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۸۵	۰/۲
۱۱	۴۵	۱۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۵	۰/۱۸
۱۲	۴۵	۲۰۰	۳۰۰	۰/۰۰۰۴	-	۰/۰۰۰۶	۰/۳۵
۱۳	۴۵	۲۵۰	۱۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳۲	۰/۶
۱۴	۴۵	۲۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱۸	۰/۵۸
۱۵	۴۵	۲۵۰	۳۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۲	۰/۵
۱۶	۶۰	۱۵۰	۳۰۰	-	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۱۲
۱۷	۶۰	۲۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۲۴
۱۸	۶۰	۲۰۰	۲۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴
۱۹	۶۰	۲۵۰	۲۰۰	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۹	۰/۳۴



شکل ۱۰: نمودار نشست مربوط به دو لایه با ضریب پواسون‌های متفاوت واحدها بر حسب متر



شکل ۱۱: نمودار کرنش مربوط به دو لایه با ضریب پواسون‌های متفاوت واحد محور طولی بر حسب متر

ج- با تغییر عمق، میزان نشست و کرنش فشاری افزایش می‌یابند ولی کرنش‌های کششی به شرط ثابت بودن عرض تغییر چندانی ندارند.

۴-۲- مشخصات لایه‌های سنگی در بر گیرنده

از این دسته به پارامترهای ضریب پواسون و مدول یانگ پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱- بررسی اثر ضریب پواسون

در جدول شماره ۵ مشخصات دو لایه مشابه که فقط در ضریب پواسون مختلف می‌باشند، آورده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود با تغییر این ضریب اختلاف میزان نشست و کرنش قابل ذکر نیست.

جدول ۵: مشخصات دو لایه مشابه با ضریب پواسون‌های متفاوت

لایه	شیب	عرض	عمق	ضریب پواسون
۱	۱۵	۱۵۰	۱۰۰	۰/۱
۲	۱۵	۱۵۰	۱۰۰	۰/۲

۴-۲-۲- بررسی اثر ضریب یانگ

میزان نشست و کرنش سطح زمین با ضریب یانگ نسبت معکوس دارد. این مسئله در جدول ۶ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

جدول ۶: مشخصات دو لایه با ضریب یانگ‌های متفاوت

لایه	شیب	عرض	عمق	ضریب یانگ (مگا پاسکال)
۱	۱۵	۱۵۰	۱۰۰	0.05×10^5
۲	۱۵	۱۵۰	۱۰۰	0.25×10^5

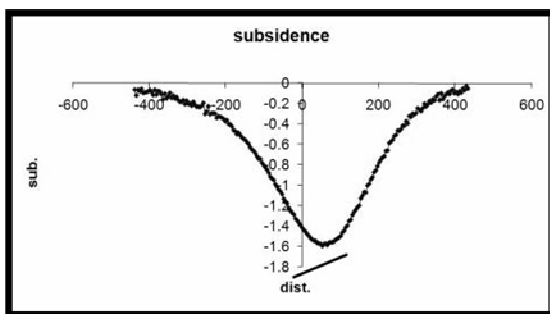
جدول ۷: مشخصات پهنه شماره ۲ غربی لایه C1 معدن پروده ۱ طیس و سنگ پوشان (سنگ در بر گیرنده)

شیب لایه (درجه)	ضخامت لایه (متر)	عمق لایه (متر)	عرض پهنه (متر)	دانسیته (ton/m ³)
۱۴	۲	۲۹۲	۲۱۳	۱/۲
دانسیته سنگ پوشان (ton/m ³)	ضریب یانگ (Gpa)	نسبت پواسون ذغال	ضریب یانگ سنگ پوشان (Gpa)	نسبت پواسون سنگ پوشان
۲/۵	۱/۵	۰/۳	۲	۰/۳

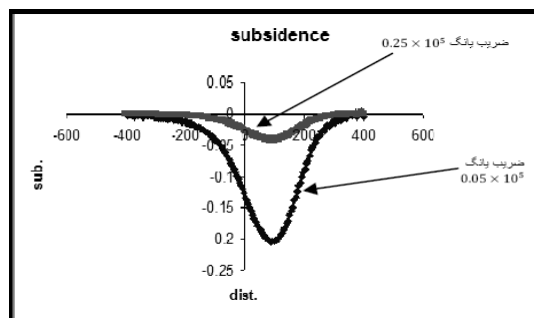
جدول ۸: مقایسه به دست آمده مطالعه موردی به دو روش گرافیکی و ناپیوستگی در جابجایی با مرتبه بالا

روش حل مسئله	زاویه حدی بالا شیب (درجه)	زاویه حدی پایین شیب (درجه)	زاویه حدی مرکزی (درجه)	نشست ماکزیمم (متر)
گرافیکی	۱۹	۵۱	۱۴	۱/۷۵
ناپیوستگی در جابجایی با ...	۲۴	۵۸	۱۰	۱/۶
روش حل مسئله	کرنش کششی بالا شیب	کرنش کششی پایین شیب	کرنش کششی مرکزی در مرکز	منبع
گرافیکی	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷۲	[۱]
ناپیوستگی در جابجایی با ...	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۶	-

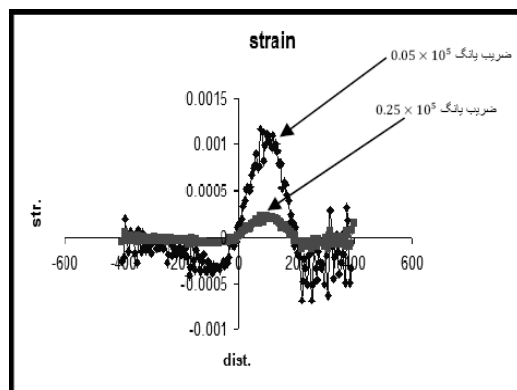
در شکل‌های شماره ۱۴ و ۱۵ به ترتیب منحنی نشست و کرنش را در پهنه مذکور که با روش ناپیوستگی در جابجایی با مرتبه بالا حل شده نشان می‌دهند.



شکل ۱۴: منحنی نشست در پهنه ۲ غربی معدن ذغال سنگ پروده ۱ طیس (واحدها بر حسب متر است)



شکل ۱۲: نمودار نشست مربوط به دو لایه با ضریب یانگ‌های متفاوت واحدها بر حسب متر



شکل ۱۳: نمودار کرنش مربوط به دو لایه با ضریب یانگ‌های متفاوت واحد محور طولی بر حسب متر

۵- مطالعه موردی

برای مطالعه موردی پهنه شماره ۲ غربی در لایه C1 معدن ذغال سنگ پروده ۱ طیس در نظر گرفته شده است. مورد ذکر شده با دو روش گرافیکی و ناپیوستگی در جابجایی با مرتبه بالا حل شد. در جدول شماره ۷ مشخصات کارگاه استخراج و پارامترهای مورد استفاده و در جدول شماره ۸ نتیجه‌های به دست آمده از حل مثال در دو حالت آورده شده است.

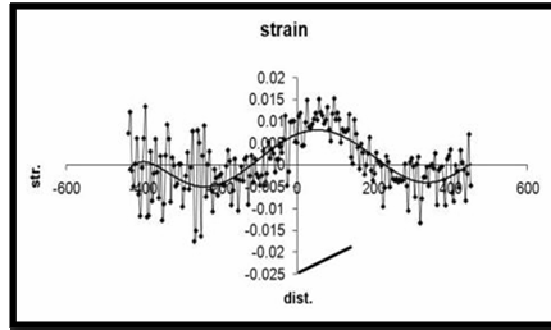
منابع

- [1] Brady B.H.G. and Brow E.T.; 1993; "Rock Mechanics for Underground Mining" champer and Hall, Second edition.
- [2] Howard L. Hartman (editor); 1996; "SME Mining Engineering Hand book"; Second -Edition.
- [3] Whittaker B.N. and redish D.J.; 1989; "National Coal Board's subsidence engineering Handbook"; Elsevier science publisher B.V.
- [4] Crouch S. L. and Starfield A. M.; 1983; "Boundary Element Methods in Slid Mechanics"; Allen and Unwin, London.
- [5] فاتحی مرجی، محمد؛ ۱۳۸۴؛ "استفاده از روش المان مرزی ناپیوستگی در جابجایی برای حل مسائل معدنی" فصل نامه علمی تخصصی کاوش؛ دانشکده مهندسی معدن دانشگاه یزد.
- [6] Fatehi M. M.; 1997; "Modeling of Cracks in Rock Fragmentation with a Higher Order Displacement Discontinuity Method"; Phd Thesis, Mining Engineering Department, Middle Earth Technical University, Ankara, Turkey.
- [7] Fatehi M. M., Hosseini nasab H. and Kohsary A. M.; 2006; "On the Uses of Special Crack Tip Elements in Numerical Rock Fracture"; International Journal of Solids and Structures; Vol. 43, pp. 1669-1692.
- [8] Crouch S. L.; 1976; "Solution of Plane Elasticity Problems by the Displacement Discontinuity Method"; International Journal for Numerical Method in Engineering; Vol.10, pp. 301-343.

[۹] ذاکری نیا، مهدیه؛ ۱۳۸۴؛ "بررسی نشست زمین در معدن زغال سنگ پروده ۱ طبس به روش تجربی"؛ پایان نامه کارشناسی؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد.

پی‌نوشت‌ها

- ¹ settlement
² sinking
³ lowering
⁴ vertical curvature
⁵ Graphical Method
⁶ Profile Functions
⁷ Influence Functions
⁸ Superposition
⁹ Phenomenological



شکل ۱۵: منحنی کرنش در پهنه ۲ غربی معدن ذغال سنگ پروده ۱ طبس (واحد محور طولی بر حسب متر است)

با مراجعه به جدول شماره ۸ مشاهده می‌شود که روش ناپیوستگی در جابجایی بالا هم خوانی نسبتاً مناسبی با روش تجربی (گرافیکی) دارد. لازم به ذکر است روش عددی مورد استفاده میزان نشست و کرنش‌ها را به جز کرنش پایین شیب کمتر از روش تجربی نشان داده و زاویه حدی قائم را نیز بیشتر از روش تجربی نشان می‌دهد. به بیان دیگر روش ناپیوستگی در جابجایی با مرتبه بالا محدوده نشست یافته را کمی بیشتر از روش گرافیکی نشان می‌دهد ولی کرنش‌ها را کمتر از روش گرافیکی محاسبه می‌کند. اما هر دو روش جواب نزدیک به هم ارائه می‌دهند.

۴- نتیجه گیری

الف- میزان نشست با کسینوس زاویه شیب لایه نسبت مستقیم دارد. این مسئله در مشاهدات تجربی نیز دیده شده است.

ب- با افزایش عرض استخراج، میزان نشست و کرنش‌ها افزایش می‌یابد. این مورد تا رسیدن عرض استخراج تا حد بحرانی ادامه دارد و بعد از آن میزان ماکزیمم کرنش‌ها و نشست ثابت باقی می‌ماند. فقط محدوده نشست یافته گسترده‌تر می‌گردد.

ج- با تغییر عمق، میزان نشست و کرنش فشاری افزایش می‌یابد ولی کرنش‌های کششی تغییر چندانی ندارند. این مورد کاملاً به عرض بحرانی استخراج بستگی دارد.

د- ضریب پواسون هیچ اثری بر میزان نشست و کرنش ندارد.

ه- ضریب یانگ بر میزان نشست و کرنش تاثیر معکوس دارد.