

# پیش‌بینی نشست سطح زمین در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار زغال‌سنگ با استفاده از تابع پروفیل

احمد اسدی<sup>i</sup>؛ کورش شهریار<sup>ii</sup>

## چکیده

پدیده نشست از پی‌آمدهای نامطلوب استخراج ذخایر زیرزمینی از جمله زغال‌سنگ در بسیاری از کشورهای جهان است. این پدیده می‌تواند موجب بروز خسارت در محیط زیست و همچنین سازه‌های سطحی و زیرزمینی در منطقه معدنی شود. تاکنون مدل‌های زیادی برای تعیین میزان نشست در اثر استخراج ذخایر زیرزمینی در شرایط متفاوت، توسعه داده شده است ولی هیچکدام نمی‌توانند مقدار نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار را به خوبی تعیین کنند. در این مقاله یک تابع پروفیل دو ضابطه‌ای برای این منظور معرفی شده است که از آن می‌توان برای پیش‌بینی پروفیل‌های نامتقارن نشست استفاده کرد. در این تحقیق از مدل جدید به منظور محاسبه نشست در معدن لیژوویزی در کشور چین استفاده شد و نتایج آن با داده‌های اندازه‌گیری شده از وقوع نشست در این منطقه مقایسه گشت. این مقایسه نشان داد که مدل جدید با ضریب همبستگی ۰/۹۹۷ با پروفیل واقعی نشست مطابقت دارد. به این ترتیب انتظار می‌رود بتوان از مدل جدید با دقت کافی برای پیش‌بینی نشست در لایه‌های شیب‌دار زغال‌سنگ استفاده کرد.

## کلمات کلیدی

نشست، استخراج لایه شیب‌دار زغال‌سنگ، روش جبهه‌کار طولانی، تابع پروفیل، معدنکاری تخریبی.

## *Prediction of Surface Subsidence Due to Inclined Coal Seam Mining Using Profile Function*

Ahmad Asadi; Kourosch Shahriar

### ABSTRACT

Subsidence is an undesirable consequence of underground mining in many countries. It can cause environmental damage and harm surface structures in the mine area. There are many methods for prediction of surface subsidence due to mining activities. Prediction of subsidence due to inclined coal seam working is complicated for non-symmetric nature of the subsidence curve trough. In this research, a new two-conditional function is developed to predict non-symmetric curve of subsidence profile above an inclined longwall face. The results is compared to the subsidence profiles obtained from the Lizhuizi coalmine in China. The coefficient of deviations between calculated and measured data is 0.997. This comparison shows that mining subsidence can be predicted with a reasonable degree of accuracy using the proposed new method.

### KEYWORDS

Subsidence, inclined coal seam mining, longwall mining, profile function, caving mining methods.

<sup>i</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد تهران جنوب. پست الکترونیک: [asadi@azad.ac.ir](mailto:asadi@azad.ac.ir)

<sup>ii</sup> دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

شده در این زمینه نیست و لازم است تا در این خصوص تحقیقات بیشتری صورت بگیرد. یکی از ویژگی‌های نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار، نامتقارن بودن شکل گودال نشست است که به همین علت در این شرایط پیش‌بینی میزان جابه‌جایی قائم در نقاط مختلف منطقه نشست دشوار خواهد بود.

## ۲- روش‌های پیش‌بینی نشست

به طور کلی روش‌های پیش‌بینی نشست را می‌توان به شش گروه تقسیم کرد. این شش گروه عبارتند از: روش‌های نظری، تابع پروفیل، تابع تأثیر، تجربی، مدل‌سازی فیزیکی و مدل‌سازی عددی. در ادامه این روش‌ها به طور خلاصه شرح داده می‌شوند.

### ۲-۱- روش نظری

روش نظری که بیشتر بر مبنای تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته ارائه شده است، سعی در تشریح مکانیزمی دارد که بتواند میزان نشست در سطح زمین را پیش‌بینی کند. در این روش رفتارهای مختلف الاستیک، پلاستیک، ویسکوالاستیک، الاستوپلاستیک و غیره به سنگهای تشکیل دهنده طبقات بالای فضای استخراجی نسبت داده می‌شود و با این فرض میزان نشست در سطح زمین پیش‌بینی می‌گردد.

### ۲-۲- روش تجربی

در روش تجربی برای حالت‌های مختلف از شکل و ابعاد فضای استخراج شده، نمودار و جدول‌هایی تهیه شده است که با استفاده از آنها می‌توان نشست در سطح زمین را پیش‌بینی کرد.

از جمله شناخته شده‌ترین نمودارهای تجربی می‌توان به نمودارهایی که توسط سازمان زغال‌سنگ انگلستان<sup>[۱۲]</sup> ارائه شده است اشاره کرد. این نمودارهای از اجرای مطالعات وسیع در زمینه نشست حاصل از اجرای عملیات معدن‌کاری در این کشور به دست آمده است.

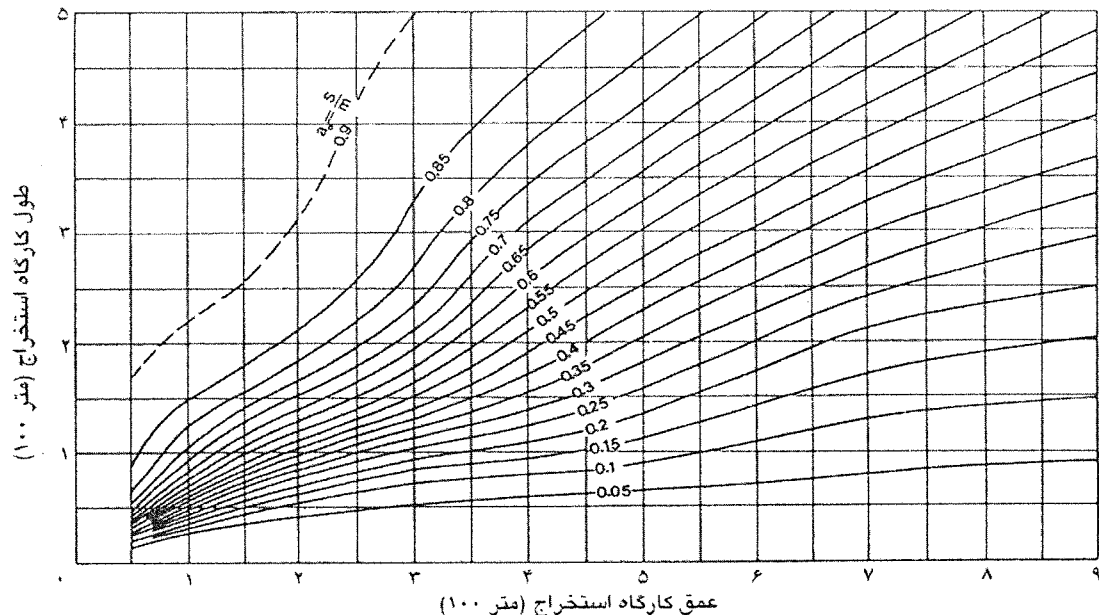
یکی از نمودارهای تهیه شده توسط سازمان زغال‌سنگ انگلستان برای تعیین میزان نشست ( $S$ ) با توجه به ابعاد کارگاه استخراج، عمق کارگاه و ضخامت لایه ( $m$ ) در شکل (۱) نشان داده شده است.

اگرچه استخراج ذخایر معدنی به روش‌های زیرزمینی در مقایسه با روش‌های سطحی خسارات کمتری به محیط زیست وارد می‌کند، اما گاهی به کارگیری روش‌های زیرزمینی نیز پی‌آمدهایی به دنبال دارند که تهدیدی برای محیط زیست و سازه‌های سطحی محسوب می‌شوند. از جمله این پی‌آمدها می‌توان به پدیده نشست اشاره کرد.

از دیدگاه زیست محیطی این پدیده موجب بروز تغییراتی در محیط زیست می‌شود که معمولاً با به هم خوردن وضعیت تعادل زیست‌جانداران همراه است. به طور کلی نشست می‌تواند موجب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، تغییر در ظرفیت مخازن آب زیرزمینی، تغییر در دبی جریان‌های آب سطحی و زیرزمینی، هدر رفتن آب در جریان‌های سطحی و سفره‌های آب زیرزمینی، تغییر در مسیر جریان آب رودخانه‌ها، تغییر در پوشش سطحی جنگل‌ها، تغییر در چهره زیستگاه‌های طبیعی و تغییر در خواص خاک شود. مثال‌های زیادی وجود دارد [۶]، [۸]، [۱۱]، که نشان می‌دهند نشست چه در سطح زمین و چه در زیر زمین، می‌تواند آسیب‌هایی را به سازه‌های واقع در محدوده شامل ساختمانها، جاده‌ها، پل‌ها، خطوط راه‌آهن، شبکه‌های انتقال آب و هوای فشرده، کابل‌های نوری، دکل‌های انتقال برق، دکل‌های مخابراتی، منابع نگهداری آب و سوخت، تونل‌ها، چاه‌ها، کارگاه‌های استخراج، پذیرگاه‌ها و مغارها و چاه‌های نفت و آب وارد کند.

در بسیاری از کشورهای جهان که ذخایر معدنی در زیر مناطق مسکونی، صنعتی و یا کشاورزی قرار دارند شناخت این پدیده اهمیت بالایی پیدا کرده است. گاهی نیز نزدیکی تاسیسات معدن به محل وقوع نشست اجتناب ناپذیر است. در این موارد برای کنترل نشست و یا به کارگیری تمهیداتی به منظور کاهش آسیب‌های ناشی از آن لازم است تا طراحان معدن شناخت کاملی از این پدیده داشته باشند.

مکانیزم نشست در لایه‌های افقی نسبت به لایه‌های شیب‌دار شناخته شده تر است. این شناخت به علت سادگی و همچنین تعدد تحقیق‌های اجرا شده در این زمینه است. وجود لایه‌های افقی و یا کم شیب زغال‌سنگ در برخی کشورهای پیشرفته نیز موجب افزایش انجام تحقیق در این زمینه شده است. از طرف دیگر تحقیق‌های محدودی که در زمینه نشست در لایه‌های شیب‌دار صورت گرفته است پاسخگویی تمامی سوالات مطرح



شکل (۱): نمودار تعیین نشست ارائه شده توسط سازمان زغالسنگ انگلستان [۱۲].

درست در بالای آن فرض می‌شود و با توجه به زاویه تأثیر، محدوده معینی را در سطح زمین تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. به این ترتیب تأثیر المانهای دورتر در نشست کاهش می‌یابد و المانهایی که در فاصله بسیار دور قرار دارند بدون تأثیر در نظر گرفته می‌شوند. این روش برای پیش‌بینی نشست در انواع فضاهای استخراجی حتی فضاهای دارای شکل نامنظم کاربرد دارد. این مزیت موجب برتری روش تابع تأثیر بر روش تابع پروفیل گردیده است. یک نمونه تابع پروفیل که در سال ۱۹۲۲ توسط بالس<sup>۴</sup> [۷] برای محاسبه نشست ارائه شده بود به صورت (۲) نشان داده شده است.

$$\phi(r) = \frac{S_{max}}{\pi \left[ \sin \beta \cos \beta + \left[ \left( \frac{\pi}{2} \right) - \beta \right] \right]} \times \frac{B^3 \tan^3 \beta}{r(r^2 + B^2 \tan^2 \beta)^2} \quad (2)$$

که در آن  $\phi(r)$  تابع تأثیر،  $\beta$  زاویه تأثیر<sup>۵</sup> و  $r$  فاصله نسبت به نقطه مرجع است.

#### ۲-۵- روش مدل‌سازی فیزیکی

در روش مدل‌سازی فیزیکی با ترکیب موادی چون ماسه و ژلاتین مدلی واقعی ولی کوچکتر از اندازه حقیقی از منطقه مورد بررسی تهیه می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه‌های دقیق مانیتورینگ، مقدار نشست، اندازه‌گیری و با پردازش داده‌های جمع‌آوری شده میزان نشست در منطقه پیش‌بینی می‌شود. یک نمونه مدل فیزیکی برای استفاده در پیش‌بینی نشست در شکل (۲) نشان داده شده است.

#### ۲-۳- روش تابع پروفیل

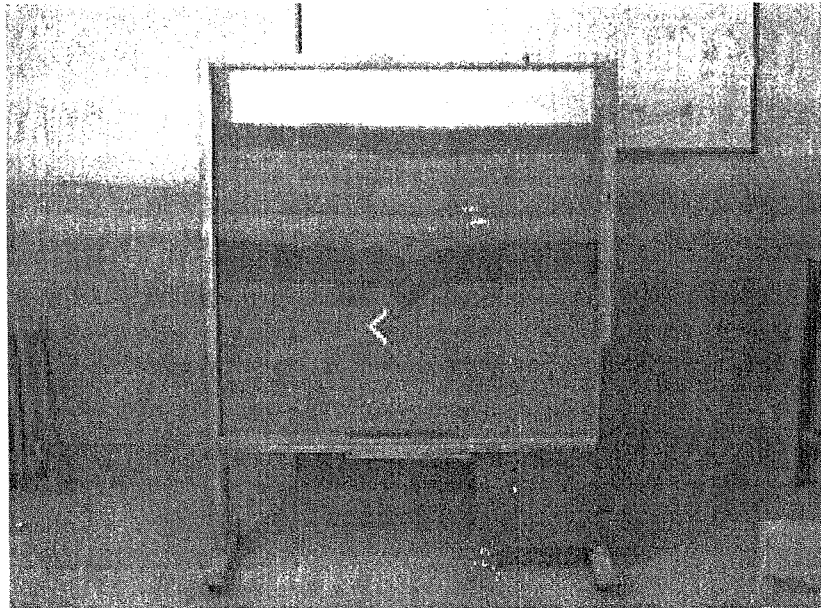
در روش تابع پروفیل مجموعه‌ای از توابع استاندارد برای پیش‌بینی نشست در سطح زمین تعریف می‌شوند که در ترکیب هر یک از آنها ضرایب ثابتی وجود دارند که بسته به محل استفاده باید به درستی تعیین شوند. برای مناطق زیادی از جهان توابع پروفیل استاندارد تهیه شده است که به عنوان مثال می‌توان به توابع تهیه شده برای مناطقی از آمریکا، انگلستان، روسیه و ژاپن اشاره کرد. این روش فقط برای پیش‌بینی نشست در کارگاههایی که شکل مربع و یا چند ضلعی‌های ساده هندسی دارند قابل استفاده است. رابطه (۱) یک تابع پروفیل از نوع تابع تانژانت هیپربولیک است که هافمن<sup>۶</sup> [۶] در سال ۱۹۶۴ برای پیش‌بینی نشست در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از مرکز پهنه استخراجی پیشنهاد کرده است.

$$S(x) = S_{max} \cdot \sin^2 \left[ \left( \frac{\pi}{4} \right) \left( \frac{x}{B} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

که در آن  $S(x)$  میزان نشست در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از نقطه مبدأ،  $S_{max}$  حداکثر نشست و  $B$  شعاع بحرانی استخراج<sup>۳</sup> است.

#### ۲-۴- روش تابع تأثیر

در این روش فضای استخراجی به صورت المان‌های کوچکی فرض می‌شود که هر یک بر میزان نشست در سطح زمین تأثیر دارند. میزان تأثیر هر المان به موقعیت آن نسبت به سطح زمین وابسته است. به این ترتیب بیشترین تأثیر هر المان



شکل (۲): یک نمونه مدل فیزیکی برای پیش‌بینی نشست [۱].

### ۳- مشخصات پروفیل نشست در لایه‌های

#### شیب‌دار

وضعیت سطح زمین پس از وقوع نشست در یک مقطع قائم یا پروفیل نشست از جمله خصوصیات مهمی است که در مطالعات مربوط به این پدیده مورد توجه قرار می‌گیرد. اگرچه پروفیل نشست در اثر استخراج لایه‌های افقی نسبت به خط قائمی که از محل وقوع حداکثر نشست عبور می‌کند دارای تقارن است اما در مورد لایه‌های شیب‌دار این‌گونه نیست و شیب پروفیل نشست در آن طرف از کارگاه استخراج که به سطح زمین نزدیکتر است تندتر و در طرف دیگر ملایم‌تر است. در سال‌های اخیر محققان تلاش‌هایی را برای تعیین شکل پروفیل نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار انجام داده‌اند از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تعیین شکل پروفیل نشست در معادن زغال‌سنگ پروده در منطقه طبس در ایران توسط اسدی و همکاران [۴] و [۵] اشاره کرد.

برای تعیین محل وقوع حداکثر نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار روش‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به کارهای انجام شده توسط کراتش<sup>۶</sup> [۱۰] اشاره کرد. نامبرده تأثیر شکل پروفیل نشست با تغییر زاویه شیب لایه استخراجی در لایه‌هایی با شیب صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه را مطالعه کرد که حاصل این تحقیق به شرح زیر است:

الف) لایه افقی - در این حالت محل وقوع حداکثر نشست در بالای مرکز کارگاه استخراج قرار دارد. با رسم یک خط قائم از

در این روش برای تبدیل شرایط مدل فیزیکی به شرایط واقعی حاکم بر محل از مدلی مانند (۳) استفاده می‌شود [۱].

$$S = f\left(\frac{L_m}{L_r}, \frac{T_m}{T_r}, \frac{C_m}{C_r}, \frac{E_m}{E_r}, \frac{v_m}{v_r}, \frac{W_m}{W_r}\right) \quad (3)$$

که در آن اندیس‌های  $m$  و  $r$  به ترتیب مشخص‌کننده پارامتر در مدل و پارامتر در سنگ است و سایر پارامترها عبارتند از:  $S$  نشست،  $L$  طول،  $T$  مقاومت کششی،  $C$  مقاومت فشاری،  $E$  مدول یانگ،  $v$  نسبت پواسون و  $W$  وزن حجمی سنگ.

در مدل فوق برای پیش‌بینی نشست در شرایط واقعی نسبت‌های مناسبی از پارامترهایی چون جرم حجمی، ابعاد و غیره بین مدل فیزیکی و شرایط حاکم بر محل تهیه و اجرا می‌شود.

### ۲-۶- روش عددی

در این روش با استفاده از روش‌های حل عددی مانند روش‌های اجزای محدود، المان مرزی، المان مجزا، و تفاضل محدود، معادلات ریاضی پیش‌بینی جابه‌جایی طبقات زمین حل می‌شود و به این ترتیب نشست در سطح زمین پیش‌بینی می‌گردد. از آنجا که با استفاده از رایانه، امکان حل معادلات پیچیده و همچنین معادلاتی با شرایط اولیه و شرایط مرزی غیر همگن میسر شده است، روش‌های عددی در بعد وسیعتری برای پیش‌بینی نشست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات افسری نژاد [۲] در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد. از جمله مزیت‌های این گروه از روش‌ها می‌توان به امکان تعریف هر نوع رفتار سنگ، عدم تجانس و لایه‌بندی اشاره کرد.

شیب‌دار و پیچیدگی‌های پیش‌بینی نشست در لایه‌های شیب‌دار پی برد.

#### ۴- روش تابع پروفیل برای پیش‌بینی نشست

به علت سهولت در استفاده از روش تابع پروفیل، این روش از جذابیت ویژه‌ای برخوردار است؛ پس در شرایطی که امکان استفاده از آن در پیش‌بینی نشست وجود داشته باشد نسبت به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. شکل کلی توابع پروفیل می‌تواند به صورت نمایی، تانژانت هیپربولیک و غیره باشد. در زیر برخی از این توابع معرفی می‌شوند.

تابع نمایی ارائه شده توسط پنگ<sup>۷</sup> و چن<sup>۸</sup> [۱۲] در سال ۱۹۸۱ از جمله توابعی است که برای معادن زغال‌سنگ آمریکا ارائه شده است. آنها میزان نشست در فاصله  $x$  از خط جبهه کار را به صورت (۴) پیش‌بینی کردند.

$$S(x) = S_{\max} \cdot e^{-c \cdot z^d} \quad (4)$$

که در آن  $c$  و  $d$  ضرایب محلی و  $z$  نسبت  $x$  به  $R$  می‌باشند.

از (۴) روابط (۵) الی (۹) نتیجه می‌شوند.

$$S(x) = S_{\max} \cdot A \quad (5)$$

$$i(x) = \frac{S_{\max}}{R} \cdot A' \quad (6)$$

$$k(x) = \frac{S_{\max}}{R^2} \cdot A'' \quad (7)$$

$$U(x) = C \cdot U_{\max} \cdot A' \quad (8)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{C \cdot U_{\max}}{R} \cdot A'' \quad (9)$$

که در آنها  $C$  از (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{1}{A'_{\max}} \quad (10)$$

سایر پارامترها در (۱۱) الی (۱۳) آمده‌اند.

$$A = e^{-c \cdot z^d} \quad (11)$$

$$A' = -c \cdot d \cdot z^{d-1} \cdot A \quad (12)$$

$$A'' = c \cdot d \left[ c \cdot d \cdot z^{2d-2} - (d-1) \cdot z^{d-2} \right] \cdot A \quad (13)$$

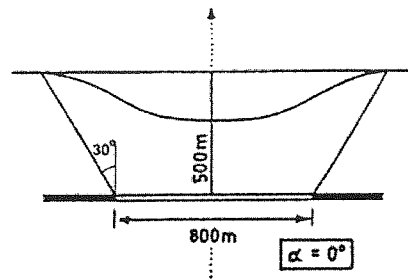
که ضرایب آن در بالا معرفی شده‌اند.

فرم دیگر از توابع پروفیل، تابع تانژانت هیپربولیک است که نمونه‌ای از آن به صورت (۱۴) است [۱۲].

$$S(x) = \frac{S_{\max}}{2} \left( 1 - \tanh\left(\frac{cx}{D}\right) \right) \quad (14)$$

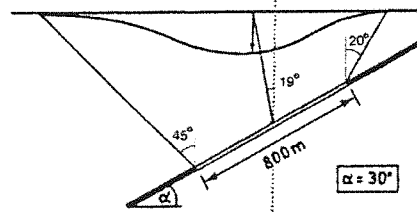
که در آن  $D$  فاصله بین نقطه عطف تا مرکز پروفیل نشست است و  $c$  ضریب ثابتی است که در تحقیق کارمیس<sup>۹</sup> و همکارانش [۱۲] در سال ۱۹۸۴ برابر  $1/4$  برای شرایط زیر بحرانی و  $1/8$  برای شرایط بحرانی و فوق بحرانی در منطقه آپالاشیا<sup>۱۰</sup> در آمریکا تعیین شد.

مرکز کارگاه استخراج به سمت بالا می‌توان موقعیت این نقطه را در سطح زمین تعیین کرد. شکل (۳) یک مقطع از این وضعیت را نشان می‌دهد.



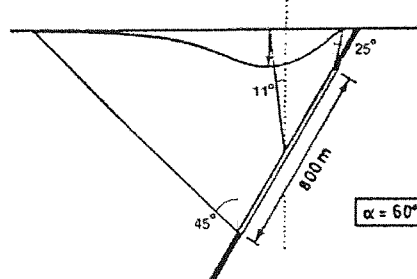
شکل (۳): موقعیت محل وقوع حداکثر نشست در اثر استخراج لایه‌های افقی [۱۰].

(ب) لایه با شیب ۳۰ درجه- در این حالت محل وقوع حداکثر نشست از امتداد قائم مرکز کارگاه استخراج به سمت قسمت عمیق کارگاه استخراج متمایل شده است. برای تعیین محل وقوع حداکثر نشست خطی از مرکز کارگاه با ۱۹ درجه انحراف نسبت به قائم رسم می‌کنیم. شکل (۴) پروفیل نشست در بالای یک کارگاه استخراج با شیب ۳۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): محل وقوع حداکثر نشست در اثر یک لایه با شیب ۳۰ درجه [۱۰].

(ج) لایه با شیب ۶۰ درجه- در این حالت نیز محل وقوع حداکثر نشست نسبت به مرکز کارگاه استخراج به سمت قسمت عمیق کارگاه متمایل شده است. برای تعیین محل وقوع حداکثر نشست خطی از مرکز کارگاه استخراج با ۱۱ درجه انحراف نسبت به قائم رسم می‌کنیم. شکل (۵) پروفیل نشست در بالای یک کارگاه استخراج با شیب ۶۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل (۵): محل وقوع حداکثر نشست در اثر استخراج یک لایه با شیب ۶۰ درجه [۱۰].

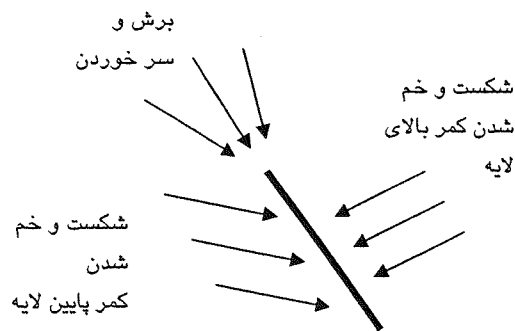
از مقایسه سه شکل (۳)، (۴) و (۵) می‌توان به برخی تفاوت‌ها بین پروفیل نشست در اثر استخراج لایه‌های افقی و

طبقات در بالای لایه‌های پر شیب ناشی از سه دسته جابه‌جایی

است. این سه دسته عبارتند از:

- شکست و خم شدن طبقات در کمر بالای لایه.
- شکست و خم شدن طبقات در کمر پایین لایه.
- برش و سر خوردن طبقات در بالای فضای استخراجی.

در شکل (۶) بردارهای جابه‌جایی بر اساس این فرضیه نشان داده شده است.



شکل (۶): شکست و جابه‌جایی طبقات بر اساس نظریه تورانو

تورانو و همکارانش برای هر یک از این جابه‌جایی‌ها یک تابع پروفیل جداگانه از نوع نمایی پیشنهاد کردند که نشست کلی از جمع این سه تابع به دست می‌آید. به این ترتیب نامبردگان برای پیش‌بینی میزان نشست در نقطه‌ای به فاصله  $x$  از لبه کارگاه استخراج رابطه (۲۰) را ارائه کردند [۱۴].

$$S(x) = S_{\max_1} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_{01}}{0.5B_1}\right)^2} + S_{\max_2} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_{02}}{0.5B_2}\right)^2} + S_{\max_3} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_{03}}{0.5B_3}\right)^2} \quad (20)$$

که در آن اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ معرف نشست مربوط به هر یک از سه نوع جابه‌جایی هستند. همچنین  $x_0$  موقعیت مرکز پروفیل نشست و  $B$  یک چهارم طول پروفیل نشست است. ایشان از مدل خرد برای پیش‌بینی نشست در مناطقی از کشور اسپانیا استفاده کردند [۱۳] و [۱۴] که مقایسه نتایج پیش‌بینی نشست و مانیتورینگ محل مربوط به یکی از این معادن در شکل (۷) آمده است.

$$S(x, y) = \frac{1}{S_{\max}} S(x) S(y) \quad (15)$$

$$i_\phi(x, y) = \frac{1}{S_{\max}} [S(y)i(x)\cos\phi + S(x)i(y)\sin\phi] \quad (16)$$

$$U_\phi(x, y) = \frac{1}{S_{\max}} [S(y)U(x)\cos\phi + S(x)U(y)\sin\phi] \quad (17)$$

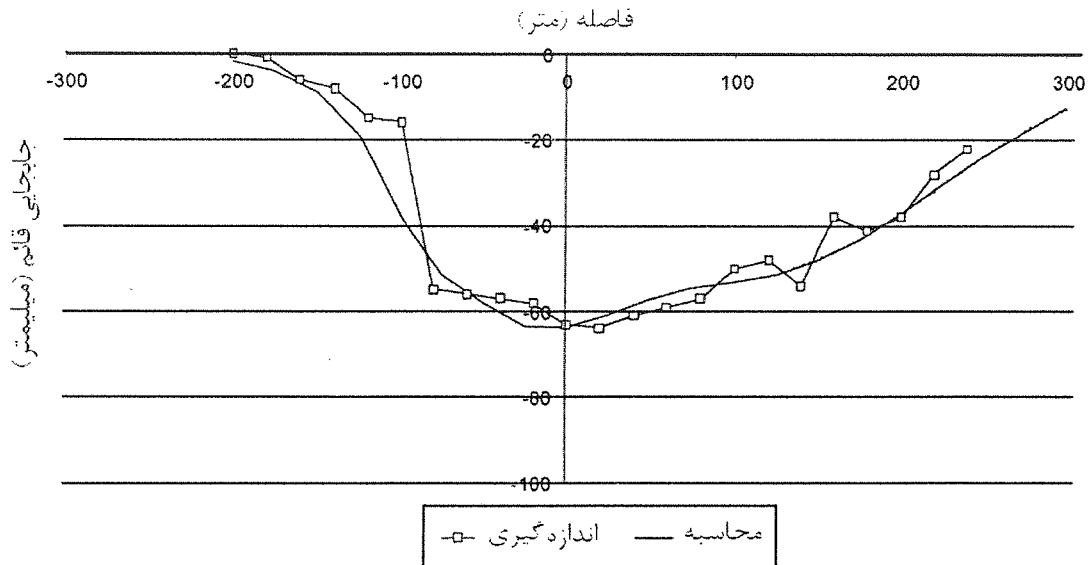
$$K_\phi(x, y) = \frac{1}{S_{\max}} [S(y)K(x)\cos^2\phi + S(x)K(y)\sin^2\phi + i(x)i(y)\sin 2\phi] \quad (18)$$

$$\varepsilon_\phi(x, y) = \frac{1}{S_{\max}} \{S(y)\varepsilon(x)\cos^2\phi + S(x)\varepsilon(y)\sin^2\phi + \frac{1}{2}[i(y)U(x) + i(z)U(y)]\sin 2\phi\} \quad (19)$$

فرم دیگر از توابع پروفیل، تابع تغییر مکان است که با استفاده از روابطی مشابه (۱۵) الی (۱۹) می‌توان شکل پروفیل نشست و جابه‌جایی را تعیین کرد [۱۲].

که پارامترهای به کار رفته در آن عبارتند از:  $S(x, y)$  نشست در سطح زمین در نقطه‌ای با مختصات  $x$  و  $y$  همچنین  $S(x)$   $i(x)$   $K(x)$   $U(x)$  و  $\varepsilon(x)$  به ترتیب نشست، شیب، انحنا، جابه‌جایی و کرنش افقی در نقطه‌ای با مختصات  $(x, 0)$  در مقطع اصلی نشست به موازات جهت پیشروی جبهه کار استخراجی،  $S(y)$   $i(y)$   $K(y)$   $U(y)$  و  $\varepsilon(y)$  به ترتیب نشست، شیب، انحنا، جابه‌جایی و کرنش افقی در نقطه‌ای با مختصات  $(0, y)$  در مقطع اصلی نشست عمود بر جهت پیشروی جبهه کار استخراجی و  $i_\phi(x, y)$   $U_\phi(x, y)$   $K_\phi(x, y)$  و  $\varepsilon_\phi(x, y)$  به ترتیب مقدار شیب، جابه‌جایی، انحنا و کرنش افقی در جهتی که با امتداد محور  $x$  زاویه  $\phi$  در جهت عقربه‌های ساعت تشکیل می‌دهد و نقطه‌ای با مختصات  $(x, y)$ .

یکی دیگر از توابع پروفیل که در سالهای اخیر برای پیش‌بینی نشست در اثر استخراج ذخایر شیب‌دار و پر شیب ارائه شده است مربوط به تحقیق تورانو<sup>۱۲</sup> و همکارانش [۱۴] است. آنها برای پیش‌بینی شکل پروفیل نشست در اثر استخراج ذخایر پر شیب به مطالعه چگونگی حرکت طبقات بالای کارگاه استخراج پرداختند. تحقیق این گروه نشان داد که جابه‌جایی



شکل (۷): نتایج مانیتورینگ و پیش‌بینی نشست توسط تورانو و همکاران [۱۴].

از یک تابع نمایی مجزا استفاده شده است که این دو تابع در (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده‌اند [۲].

$$S_1(x) = -S_{\max} e^{-f_1 \left(\frac{-x}{R_1}\right)^{g_1}} \quad (21)$$

$$S_2(x) = -S_{\max} e^{-f_2 \left(\frac{x}{R_2}\right)^{g_2}} \quad (22)$$

که در آن  $x$  فاصله نقطه مورد بررسی از محل وقوع حداکثر نشست،  $f$  و  $g$  ضرایب محلی و  $R$  نصف طول پروفیل نشست است. زیرنویس‌های ۱ و ۲ نیز بترتیب معرف بخش اول و دوم پروفیل نشست هستند.

اسدی همچنین به منظور سهولت در استفاده از مدل جدید و ارائه رابطه‌ای که بتواند پروفیل کامل نشست را پیش‌بینی کند، با استفاده از تابع علامت<sup>۱۳</sup> دو رابطه (۲۱) و (۲۲) در یک تابع ریاضی دو ضابطه‌ای قرار داد. تابع جدید به صورت (۲۳) است [۲].

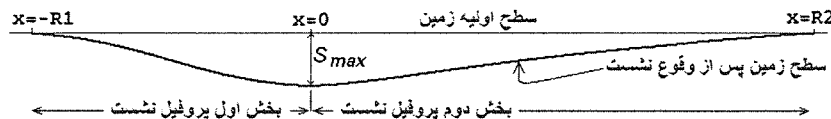
$$S(x) = -S_{\max} \left[ c_1 \cdot e^{-f_1 \left(\frac{-x}{R_1}\right)^{g_1}} + c_2 \cdot e^{-f_2 \left(\frac{x}{R_2}\right)^{g_2}} \right] \quad (23)$$

که پارامترهای بکار رفته در آن از روابط (۲۴) الی (۲۶) محاسبه می‌شوند [۲].

به این ترتیب تحقیق تورانو و همکارانش با استفاده از مدل خود توانستند شکل نامتقارن پروفیل نشست را پیش‌بینی کنند اما همانطور که در شکل (۷) نیز نشان داده شده است در برخی نقاط مانند حدود ۱۰۰ متر پشت محل حداکثر نشست و حدود ۱۵۰ متری جلوی این نقطه همچنان بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی نشست اختلاف وجود دارد.

مدل دیگری که در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار ارائه شده است مربوط به پژوهشی است که اسدی [۲] در پایان نامه دکتری خود انجام داده است. وی با استفاده از تابع پروفیل دوضابطه‌ای توانست شکل پروفیل نشست حاصل از استخراج یک لایه شیب‌دار زغال‌سنگ را پیش‌بینی کند. از آنجا که شکل پروفیل نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار نسبت به نقطه وقوع حداکثر نشست نامتقارن است، برای همین نامبرده پروفیل نشست را به دو بخش مجزا تقسیم کرد که مرز بین این دو بخش محل وقوع حداکثر نشست است. شکل (۸) پروفیل کامل نشست در اثر استخراج یک لایه شیب‌دار و چگونگی تقسیم آن به دو بخش را نشان می‌دهد.

سپس به منظور پیش‌بینی هر یک از دو قسمت پروفیل جدید



شکل (۸): پروفیل نشست و چگونگی تقسیم آن به دو بخش مجزا [۲].

جدول (۲) پارامترهای مورد نیاز در رابطه تابع پروفیل برای

معدن لیژوویزی چین.

پارامتر	مقدار
$f_1$	۶
$g_1$	۲/۲
$f_2$	۲/۳
$g_2$	۲/۳

با قرار دادن اطلاعات جدول‌های (۱) و (۲) در (۲۳)، تابع (۳۴) برای پیش‌بینی پروفیل نشست در این معدن به دست آمد.

$$S(x) = -0.3 \times \left[ c_1 \cdot e^{-6x \left( \frac{x}{109.1} \right)^{2.2}} + c_2 \cdot e^{-2.3x \left( \frac{x}{178.4} \right)^{2.3}} \right] \quad (34)$$

در این رابطه  $S(x)$  متغیر وابسته و  $x$  متغیر مستقل است و ضرایب  $c_1$  و  $c_2$  از توابع علامت که به متغیر  $x$  وابسته‌اند به دست می‌آیند.

نتایج محاسبه میزان جابه‌جایی با استفاده از رابطه تابع پروفیل به همراه داده‌های اندازه‌گیری شده (مربوط به مانیتورینگ) از معدن لیژوویزی در جدول (۳) آمده‌اند. نقطه با فاصله صفر در جدول (۳) محل وقوع حداکثر نشست را نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقایسه نتایج محاسبه جابه‌جایی با استفاده از مدل

تابع پروفیل و داده‌های اندازه‌گیری شده.

فاصله (متر)	پیش‌بینی (متر)	اندازه‌گیری (متر)
-۱۱۰	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۱
-۸۰	-۰/۰۱۲	-۰/۰۱۵
-۷۰	-۰/۰۳۷	-۰/۰۳۱
-۵۰	-۰/۰۹۱	-۰/۱۰۲
-۴۰	-۰/۱۶۳	-۰/۱۵۵
-۲۰	-۰/۲۴۱	-۰/۲۶۰
-۱۰	-۰/۲۹۲	-۰/۲۹۱
۰	-۰/۳۰۰	-۰/۳۰۰
۲۰	-۰/۲۹۴	-۰/۲۸۶
۳۰	-۰/۲۷۰	-۰/۲۶۷
۵۰	-۰/۲۲۴	-۰/۲۰۵
۶۰	-۰/۱۶۹	-۰/۱۶۸
۷۰	-۰/۱۲۳	-۰/۱۳۱
۸۰	-۰/۰۹۴	-۰/۰۹۷
۹۰	-۰/۰۷۰	-۰/۰۶۹
۱۰۰	-۰/۰۵۰	-۰/۰۴۶
۱۱۰	-۰/۰۳۴	-۰/۰۲۹
۱۲۰	-۰/۰۲۰	-۰/۰۱۷
۱۳۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۰
۱۷۸	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۰

$$S_{\max} = m \cdot a \cdot \cos(\alpha) \quad (24)$$

$$R_1 = x_1 + x_2 + x_3 \quad (25)$$

$$x_1 = h \tan(\beta_u) \quad (26)$$

$$x_2 = 0.5l \cos(\alpha) \quad (27)$$

$$x_3 = (h + 0.5l \sin(\alpha)) \tan(\theta) \quad (28)$$

$$R_2 = x_4 + x_5 \quad (29)$$

$$x_4 = 0.5l \cos(\alpha) - (h + 0.5l \sin(\alpha)) \tan(\theta) \quad (30)$$

$$x_5 = (h + l \sin(\alpha)) \tan(\beta_l) \quad (31)$$

$$c_1 = -0.5(\text{sign}(x) - 1) \quad (32)$$

$$c_2 = 0.5(\text{sign}(x) + 1) \quad (33)$$

که در این روابط  $m$  ضخامت لایه استخراجی،  $a$  فاکتور نشست،  $\alpha$  زاویه شیب لایه،  $\beta_u$  زاویه تأثیر در طرف کم عمق کارگاه استخراج،  $\beta_l$  زاویه تأثیر در طرف عمیق کارگاه استخراج و  $\theta$  زاویه انحراف (زاویه بین خطی که از مرکز کارگاه استخراج به صورت قائم رسم شده است و خط واصل بین مرکز کارگاه استخراج و تصویر نقطه حداکثر نشست بر روی سطح زمین) است.

## ۵- استفاده از مدل تابع پروفیل دو ضابطه‌ای برای

### پیش‌بینی نشست در لایه‌های شیب‌دار

در این تحقیق از مدل تابع پروفیل دو ضابطه‌ای ارائه شده توسط اسدی برای پیش‌بینی نشست در اثر استخراج لایه C13 معدن زغال‌سنگ لیژوویزی<sup>۱۹</sup> در کشور چین استفاده شده است. اطلاعات معدن مورد نظر از تحقیقی که هیویانگ<sup>۲۰</sup> و همکارانش [۹] برای پیش‌بینی نشست در این منطقه انجام داده بودند به دست آمد.

مشخصات لایه و کارگاه استخراج در جدول (۱) و همچنین پارامترهای مورد نیاز جهت استفاده در تابع پروفیل جدید (که از داده‌های معدن به دست آمده است) در جدول (۲) ارائه شده‌اند. جدول (۱) مشخصات لایه استخراجی و کارگاه استخراج در

معدن لیژوویزی چین [۹].

پارامتر	مقدار
$m$	۱/۱ متر
$\alpha$	۴۵ درجه
$h$	۹۱/۹ متر
$l$	۹۰ متر
$a$	۰/۳۸۵۷
$\beta_u$	۳۶/۵ درجه
$\beta_l$	۵۶/۸ درجه
$\theta$	۵ درجه
$R_1$	۱۰۹/۱ متر
$R_2$	۱۷۸/۴ متر



در این مقاله برای پیش‌بینی نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار زغال‌سنگ از یک تابع پروفیل نمایی دو ضابطه‌ای استفاده شده است که پیش از این برای پیش‌بینی نشست در معادن زغال‌سنگ پروده در منطقه معدنی طیس در ایران استفاده شده است. این تابع قادر است شکل نامتقارن پروفیل نشست را پیش‌بینی کند. برای استفاده از تابع پروفیل نیز مانند سایر توابع پروفیل لازم است تا مطالعات محلی به منظور تعیین ثابت‌های به کار رفته در مدل انجام شود.

با استفاده از تابع پروفیل مورد نظر نشست در اثر استخراج لایه  $C/3$  در معدن زغال‌سنگ لیژوویزی چین محاسبه شد و با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل مقایسه شود. در نتیجه‌ی این مقایسه ضریب همبستگی بین اعداد حاصل از محاسبه و داده‌های اندازه‌گیری شده  $0/997$  به دست آمد. این مقایسه نشان داد که از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی نشست در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار زغال‌سنگ استفاده کرد.

از خصوصیات ویژه مدل‌های تابع پروفیل می‌توان به سادگی آنها اشاره کرد. این خصوصیت به کاربر امکان می‌دهد تا به آسانی بتواند از این نوع مدل‌ها در انجام محاسبات پیش‌بینی نشست و همچنین نرم‌افزارهای رایانه‌ای استفاده کند. اما استفاده از توابع پروفیل دارای محدودیت‌هایی است که یکی از مهم‌ترین آنها وابستگی به داده تجربی است.

در جدول (۳)، ضریب همبستگی بین اعداد مربوط به پیش‌بینی و داده‌های اندازه‌گیری شده برابر با  $0/997$  بدست آمده است که دقت خوب مدل جدید در پیش‌بینی نشست در لایه‌های شیب‌دار را نشان می‌دهد.

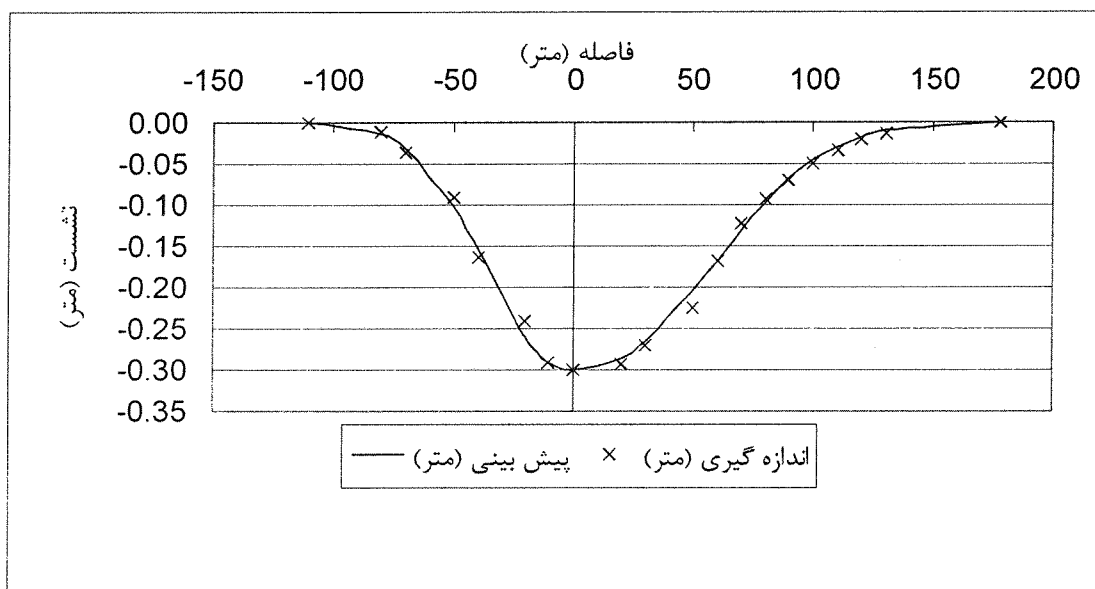
اطلاعات جدول (۳) به صورت نمودار در شکل (۹) نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که:

- ۱- اطلاعات برداشت شده از وقوع نشست در این منطقه بیان‌کننده شکل نامتقارن پروفیل نشست است که از خصوصیات ویژه استخراج لایه‌های شیب‌دار محسوب می‌شود.
- ۲- تابع پروفیل دو ضابطه‌ای استفاده شده در این تحقیق به خوبی شکل نامتقارن پروفیل نشست در این معدن را پیش‌بینی کرد و مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت بسیار خوبی با مقادیر پیش‌بینی شده دارند که نشان دهنده کارایی خوب تابع پروفیل جدید جهت پیش‌بینی پروفیل نشست در لایه‌های شیب‌دار است.

## ۶- نتیجه‌گیری

به منظور جلوگیری از بروز خسارت به محیط زیست و همچنین سازه‌های سطحی و زیرزمینی، پیش‌بینی دقیق نشست در اثر انجام عملیات معدنکاری از اهمیت زیادی برخوردار است. این پیش‌بینی در برخی حالات از جمله حالتی که استخراج از یک لایه شیب‌دار انجام می‌شود دشوارتر است.



شکل (۹): مقایسه نتایج حاصل از مدل جدید با داده‌های اندازه‌گیری شده در معدن لیژوویزی.

Hu, Z.; Gu, D.; Liu, D and Feng, H; "Farmland Damage Due to Coal Mining Subsidence and Its Remediation in Eastern China", Proceeding of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology, Beijing, China, 1999.

Huayang, D.; Jinzhuang, W.; Meifeng, C.; Lixin W.; Zengzhang, G.; "Seam Dip Angle Based Mining Subsidence Model and its Application", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, 115-123, 2002.

Kratzsch, H.; *Mining Surface Subsidence Engineering*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.

National Research Council, Multi-Hazard Identification and Risk Assessment, Federal Emergency Management Agency, 2001.

Peng, S. S.; *Surface Subsidence Engineering*, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., USA, 1992.

Rodriguez R.; Torano, J.; "Hypothesis of the multiple subsidence trough related to very steep and vertical coal seams and its prediction through profile function", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 18, 289-311, 2000.

Torano, J.; Rodriguez R.; Ramirez- Oyanguren, P.; "Probabilistic analysis of subsidence- induced strains at the surface above steep seam mining", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Vol. 37, 1161- 1167, 2000.

[۸]  
[۹]  
[۱۰]  
[۱۱]  
[۱۲]  
[۱۳]  
[۱۴]

## مراجع

- [۱] اسدی، احمد؛ مطالعه وضعیت جابجایی لایه‌های زغال‌سنگ با استفاده از مدل فیزیکی، طرح پژوهشی شماره ۱۶۷/۱۵۹، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب، ۱۳۸۴.
- [۲] اسدی، احمد؛ مدل‌سازی ریاضی به منظور پیش‌بینی نشست سطح زمین در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار زغال‌سنگ به روش تحلیلی، پایان نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۸۳.
- [۳] Afsari Nejad, M.; *Numerical Modeling of Inclined Seams*, PhD Dissertation, University of Nottingham, United Kingdom, 1999.
- [۴] Asadi, A.; Shahriar, K.; Goshtasbi, K.; "Profiling function for surface subsidence prediction in mining inclined coal seams", Journal of Mining Science, Vol. 40, No. 2, 2004.
- [۵] Asadi, A.; Shahriar, K.; Goshtasbi, K.; Najm, K.; "Development of a new mathematical modeling for prediction of surface subsidence due to inclined coal seams mining", The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 105, No. 1, 2005.
- [۶] Donnelly, L. J.; Cruz, H. D.; Asmar, I.; Zapata, O. Perez, J. D.; "The monitoring and Prediction of Mining Subsidence in the Amaga, Angelopolis, Venecia and Bolombolo Regions, Antioquia, Colombia", Engineering Geology, Vol. 59, 103- 114, 2001.
- [۷] Hartman, H. L.; "SME Mining Engineering Handbook", 2nd ed., Sacramento, California, 1992.

## زیرنویس‌ها

- <sup>۱</sup> The National Coal Board of the United Kingdom (NCB)
- <sup>۲</sup> Hoffman
- <sup>۳</sup> Radius of critical area of excavation
- <sup>۴</sup> Bals
- <sup>۵</sup> Angle of draw
- <sup>۶</sup> Kratzsch
- <sup>۷</sup> Pen
- <sup>۸</sup> Chen
- <sup>۹</sup> Karmis
- <sup>۱۰</sup> Appalachia
- <sup>۱۱</sup> Movement Function
- <sup>۱۲</sup> Torano
- <sup>۱۳</sup> Sign Function
- <sup>۱۴</sup> Lizhuizi
- <sup>۱۵</sup> Huayang