

شناسایی مسیرهای اصلی جریان سیال اطراف حفریات زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا و اتومات سلولی

قاسم شمس^۱، مصطفی شریف زاده^۲، مرتضی جوادی اصطهباناتی^۳

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر; shams@aut.ac.ir

۲-دانشیار دانشکده معدن و متالوژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر; sharifzadeh@aut.ac.ir

۳-دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده معدن و متالوژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر; ttscope@aut.ac.ir

(دریافت ۲۵ خرداد ۱۳۹۱، پذیرش ۱۰ بهمن ۱۳۹۲)

چکیده

یکی از مؤثرترین روش‌های مدل سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ و تحلیل جریان آب ورودی به درون حفریات زیرزمینی در محیط‌های سنگی دارای شکستگی، روش شبکه شکستگی مجزا (DFN) است. در بسیاری از مسائل تحلیل جریان با استفاده از روش DFN، دامنه مورد استفاده دارای چند صد تا چند هزار شکستگی است که وجود این تعداد شکستگی باعث پیچیدگی و افزایش شدید زمان محاسبات می شود. برای به کارگیری مؤثر این روش، لازم است که زمان محاسبات تا حد امکان کاهش یابد. در این مقاله، به منظور افزایش سرعت محاسبات و کاهش پیچیدگی در مسأله تحلیل جریان در شبکه شکستگی اطراف حفریات زیرزمینی، از روش اتومات سلولی به عنوان یک ابزار کمکی مفید در ترکیب با روش DFN استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی روش ارائه شده، جریان ورودی به درون مغار نیروگاه و ترانسفورمر پروژه تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه مدل سازی شد. متوسط دبی جریان آب ورودی به ازای واحد طول مغار ترانسفورمر برای مقادیر شبیه سازی ۰/۳۱ لیتر بر دقیقه و برای مقادیر واقعی ۰/۳۶ لیتر بر دقیقه بدست آمد که نشان دهنده کارایی روش توسعه داده شده در مساله تحلیل جریان است. علاوه بر این، به کارگیری روش اتومات سلولی نامنظم در ترکیب با روش شبکه شکستگی مجزا با افزایش چشمگیری در سرعت محاسبات همراه بوده است.

کلمات کلیدی

شبکه شکستگی مجزا، اتومات سلولی نامنظم، حفریات زیرزمینی، جریان سیال، مدل سازی ناپیوسته

۱- مقدمه

کنترل جریان آب ورودی به درون حفريات زیرزمینی هم در مرحله احداث و هم در مرحله بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد. پیش بینی مؤثر جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی نیازمند به کارگیری مدل مناسب برای بیان رفتار هیدرولیکی توده سنگ است. برای مدل سازی رفتار هیدرولیکی توده سنگ ابتدا لازم است که پارامترهای مؤثر در رفتار توده سنگ بررسی شده و نقش این عوامل در رفتار هیدرولیکی توده سنگ لحاظ شود.

روش‌های پیش بینی جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی را از دیدگاه مدل سازی می توان به دو دسته مدل‌های پیوسته [۱-۵] و مدل‌های ناپیوسته [۶-۱۰] تقسیم بندی کرد. محاسبه جریان آب ورودی در روش پیوسته به دو صورت تحلیلی [۱ و ۲] و عددی [۳-۵] انجام می شود. روش‌های تحلیلی محاسبه و پیش بینی جریان آب ورودی به داخل تونل از سابقه طولانی برخوردار بوده و معادلات تحلیلی زیادی توسط محققین مختلف و برای شرایط خاص از شرایط مرزی، معادله حاکم بر جریان (گذرا یا پایا) و محیط دربرگیرنده تونل ارائه شده اند. این مدل‌ها تنها برای بررسی‌های پارامتریک و ساده (در مراحل اولیه طراحی و یا امکان سنجی) قابل به کارگیری بوده و دارای محدودیت‌های بسیاری در رابطه با فرضیات اولیه (فرض همسانگردی، همگن و یکنواختی توده سنگ و دایره ای بودن سطح مقطع تونل) هستند. برای رفع بعضی از این محدودیت‌ها (شکل سطح مقطع تونل، تحلیل‌های سه بعدی و در نظر گرفتن قسمتی از ناهمگنی‌های موجود در محیط) محققین مختلف از روش‌های عددی (پیوسته) متفاوتی شامل المان مرزی [۳]، المان محدود [۴] و تفاضل محدود [۵] برای محاسبه جریان آب ورودی به داخل حفريات زیرزمینی استفاده کرده اند.

روش‌های پیش بینی جریان آب ورودی به داخل تونل با استفاده از مدل سازی پیوسته (تحلیلی و عددی) همواره با محدودیت‌هایی در ارتباط با شرایط ناهمگن و ناهمسانگردی شدید محیط همراه هستند و علاوه بر این نسبت به توصیف پراکندگی فضایی نقاط تخلیه [۸] جریان عاجز هستند. تخمین نادرست نرخ جریان آب ورودی به درون حفريات زیرزمینی تا حدی به دلیل فهم ناقص از هندسه شبکه شکستگی‌هایی است که جریان را به درون این حفريات هدایت می‌کنند [۲]. مطالعات محققین مختلف نشان می دهد که روش‌های پیوسته

نسبت به اعمال صحیح تاثیر هندسه شکستگی‌ها در رفتار جریان دارای محدودیت‌های زیادی هستند [۱۱]. برای رفع بعضی از محدودیت‌های روش پیوسته، محققین مختلف از روش‌های عددی ناپیوسته برای پیش بینی جریان آب ورودی به تونل استفاده کرده اند. در اکثر روش‌های ناپیوسته مورد استفاده برای پیش بینی جریان آب ورودی به تونل، شکستگی‌ها به صورت نامحدود [۷ و ۶] لحاظ شده است.

شکستگی‌های واقعی دارای گسترش طولی محدود بوده و فرض نامحدود بودن گسترش فضایی شکستگی‌ها اصلا با شرایط واقعی انطباق ندارد. در نتیجه برای داشتن یک تحلیل دقیق تر و رسیدن به نتایج با قابلیت اعتماد بالاتر، باید هندسه شکستگی‌ها همخوانی بیشتری با وضعیت واقعی داشته باشد. با این وجود، در تعدادی محدودی از مطالعات [۸-۱۰] طول شکستگی‌ها به صورت محدود در نظر گرفته شده است. برای اعمال محدود بودن طول شکستگی‌ها معمولا از مدل شبکه شکستگی مجزا (DFN^۱) استفاده می شود. روش مدل سازی DFN به دلیل اینکه در نظر گرفتن نقش شکستگی‌ها به صورت صریح، انطباق بیشتری با شرایط واقعی (نسبت به سایر روش‌ها) داشته و به عنوان تنها ابزار مدل سازی پدیده‌های مربوط به جریان سیال در مقیاس میدان نزدیک^۲ مطرح است [۱۲].

در اغلب موارد، دامنه‌های DFN ساخته شده حاوی چند صد تا چند هزار شکستگی است که این مسئله باعث افزایش بسیار شدید زمان محاسبات می شود. این موضوع یکی از مهم ترین ضعف‌های روش DFN است که برای افزایش کارایی این روش، بایستی ابزارهای مناسبی برای کاهش زمان محاسبات به کار گرفته شود. در این مقاله، از توانایی‌های روش اتومات سلولی (که یک مدل گسسته ریاضی برای سیستم‌های طبیعی پیچیده است) برای کاهش زمان محاسبات در مدل DFN استفاده شده است. بدین منظور، یک کد محاسباتی تحت عنوان FICAF^۳، بر پایه مبانی اتومات سلولی توسعه داده شده است. این کد محاسباتی، با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو از توابع توزیع احتمالاتی ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها (دانسیته، جهت‌داری و طول رخنمون شکستگی‌ها) مدل‌های DFN دوبعدی را تولید و سپس با استفاده از مفاهیم اتومات سلولی نامنظم (ICA^۴)، مسیرهای اصلی جریان سیال به درون حفریه زیرزمینی (شبکه شکستگی‌های) را شناسایی و در نهایت جریان سیال به درون حفریه زیرزمینی را در این شبکه شکستگی‌های محاسبه می کند.

- شکستگی‌هایی که هیچ فصل مشترکی با مسیرهای جریان (شبکه جریان) و مرزهای خارجی و داخلی ندارند. این شکستگی‌ها ممکن است به صورت تکی و یا در زیر شبکه‌های ایزوله شده ظاهر شوند.

- شکستگی‌هایی که فقط یک فصل مشترک با شبکه جریان دارند که در اصطلاح به آنها مسیرهای مرده اطلاق می‌شود.

- شکستگی‌هایی که در یک شبکه متصل به هم ظاهر میشوند ولی بین مرزهای داخلی و خارجی ارتباط ندارند (زیرشبکه میانی) و یا فقط یک اتصال با یکی از مرزهای داخلی یا خارجی دارند که به اصطلاح به زیر شبکه‌های مرده تعبیر می‌شوند [۱۴]. حذف شکستگی‌های غیرهادی از شبکه جریان، زمان برترین مرحله محاسباتی در مدل سازی جریان با استفاده از مدل DFN است. در این مقاله، از توانایی‌های روش اتومات سلولی برای کاهش زمان محاسبات مربوط به حذف شکستگی‌های غیرهادی در مدل DFN استفاده شده است. بعد از حذف شکستگی‌های غیرهادی، با توجه به فصل مشترک شکستگی‌ها، شبکه کانالی مسیرهای جریان در داخل دامنه ساخته می‌شود. رئوس هر کانال به عنوان یک گره جریان در نظر گرفته شده و کانال ارتباطی بین دو راس هر کانال‌ها و عنوان یک المان لحاظ می‌شود. در نهایت همه کانال‌ها و گره‌های متناظر به عنوان دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده و معادلات جریان سیال برای این دامنه محاسباتی حل می‌شود [۹].

۲-۲- حل معادلات جریان در شبکه

ساده ترین مدل برای بیان رفتار جریان درون شکستگی (کانال)، فرض صفحات موازی به عنوان دیواره‌های شکستگی است. با استفاده از این فرض و ساده سازی معادلات حاکم، دبی جریان عبوری از شکستگی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$Q_{ij} = -\frac{wb_h^3}{12\mu} \frac{\Delta H}{\Delta l} = c_{ij}(H_i - H_j) \quad (1)$$

که در آن

H_i : هد کلی در گره i ام (متر)

Q_{ij} : دبی جریان عبوری از کانال (شکستگی) حد فاصل بین گره‌های i ، j که جریان از i به سمت j مثبت در نظر گرفته می‌شود (متر مکعب بر ثانیه)

c_{ij} : ضریب هدایت مربوط به کانال حد فاصل گره‌های i ، j (متر مربع بر ثانیه)

b_h : دهانه هیدرولیک کانال (متر)

در این مقاله، ابتدا به اختصار روش تولید شبکه شکستگی مجزا و همچنین مبانی اتومات سلولی بیان و در ادامه کد محاسباتی FICAF معرفی و روند استفاده از مفاهیم اتومات سلولی برای شناسایی شبکه شکستگی متصل^۵ (هادی)، به عنوان قسمتی از وظایف این کد، شرح داده شده است. در نهایت به عنوان یک مطالعه موردی و به منظور اعتبار سنجی کد محاسباتی FICAF، جریان آب ورودی به مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر نیروگاه سد سیاه بیشه شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- مدل سازی جریان سیال در شبکه شکستگی

مجزا

۲-۱- ساخت شبکه شکستگی مجزا

هدف از ساخت شبکه شکستگی مجزا، ایجاد یک مدل سازی هندسی از شکستگی‌هاست که در مقیاس دوبعدی و یا سه بعدی است که معرف مشخصات تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در توده سنگ باشد [۱۳]. داده‌های لازم برای ایجاد یک شبکه شکستگی معمولاً از طریق برداشت مستقیم شکستگی‌ها از روی سطوح قابل دسترس مثل رخنمون‌ها و یا گمانه حفاری و با استفاده از روش پنجره برداشت و یا خط برداشت ثبت و به صورت توزیع‌های آماری توصیف می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. در این روش، برای هر دسته شکستگی اصلی، تعدادی شکستگی مجزا با استفاده از توابع توزیع مربوط به ویژگی‌های هندسی ساخته می‌شود. مشخصات هندسی لازم برای ساخت هر شکستگی، با استفاده از نمونه گیری مونتوکارلو از تابع توزیع چگالی احتمال ویژگی‌های هندسی دسته‌های شکستگی (توزیع طول رخنمون، جهت داری و دهانه) انتخاب می‌شود. فرآیند تولید شکستگی‌ها در داخل دامنه مورد نظر به صورت تک به تک و برای هر دسته شکستگی به طور مستقل انجام می‌شود. تولید شکستگی‌ها در دامنه تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد شکستگی موجود در دامنه به حد قابل انتظار برسد [۹].

محدود بودن طول شکستگی‌های موجود در دامنه باعث می‌شود که تعدادی از شکستگی‌ها به صورت غیرهادی ظاهر شده و در محاسبات جریان نقشی نداشته باشند. حضور شکستگی‌های غیرهادی علاوه بر اینکه باعث افزایش پیچیدگی و زمان محاسبات می‌شود، با ناپایداری حل عددی معادلات جریان نیز همراه هستند. بنابراین، برای افزایش سرعت و کارایی محاسبات لازم است که شکستگی‌های غیرهادی از شبکه حذف شوند. این شکستگی‌ها به صورت زیر دسته بندی می‌شوند [۱۴]:

U : ویسکوزیته دینامیک سیال (متر بر ثانیه)

l_{ij} : طول کانال حد فاصل گره‌های i, j (متر)

W : عرض کانال است که برای مدل‌های دو بعدی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

برای هر گره از شبکه کانالی رابطه تعادل جرم با در نظر گرفتن جریان ورودی به صورت مثبت و جریان خروجی به صورت منفی اعمال می‌شود. در این حالت مسئله جریان در شبکه به صورت ماتریسی و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$[E]\{H\} = 0 \quad (2)$$

ماتریس ضرایب (E) در معادله فوق یک ماتریس متقارن است که معمولاً تحت عنوان ماتریس هدایت گره^۶ نامیده می‌شود و بردار H بیان کننده هد کلی در گره‌ها است. مقدار λ امین درایه قطری در ماتریس E برابر با حاصل جمع هدایت همه کانال‌های متصل به گره i و مقدار درایه‌های غیر قطری ij برابر با منفی هدایت کانال حد فاصل بین گره i و j است. در صورتی که بین گره i و j یک کانال مستقیم وجود نداشته باشد مقدار درایه ij در ماتریس E برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. معادله (۲) بر اساس درجه آزادی گره‌ها گسسته سازی و ماتریس E و بردار نرخ جریان بر اساس گره‌های مرزی و گره‌های داخلی به صورت زیر مرتب سازی می‌شوند [۱۰]:

$$[E_{ff}]\{H_f\} + [E_{fc}]\{H_c\} = \{Q_f\} \quad (3)$$

اندیس f و c در معادله فوق به ترتیب مربوط به گره آزاد (هد مجهول) و گره غیر آزاد (هد معلوم) است. مقدار درایه λ ام بردار نرخ جریان $\{Q_f\}$ برای گره‌های مرزی با هد ثابت به صورت غیر صفر و برای گره‌های داخلی صفر خواهد بود. تنها ترم مجهول در معادله فوق مقادیر هد کلی در گره‌های داخلی (بردار $\{H_f\}$) است که معمولاً با استفاده از یکی از روش‌های عددی حل معادلات محاسبه می‌شود.

۳- مبانی اتومات سلولی

به طور کلی، اتومات سلولی سیستم‌های دینامیکی گسسته هستند که رفتار آن‌ها به طور کامل بر حسب روابط محلی مشخص می‌شود. اتومات سلولی مدل‌های ریاضی برای سیستم‌های طبیعی پیچیده شامل تعداد زیادی از مؤلفه‌های یکسان با اندرکنش‌های محلی است [۱۵]. هر اتومات سلولی از شبکه‌ای یک یا چند بعدی از سلول‌های فرضی تشکیل شده است. اتومات سلولی کلاسیک مجموعه‌ای از سلول‌های منظم، مجزا و از یک نوع بوده که هر سلول دارای تعداد محدودی از حالات

گسسته است. برای هر سلول در یک اتومات سلولی، بر اساس معیارهای از پیش تعیین شده، مجموعه‌ای از سلول‌ها به عنوان سلول‌های همسایه در نظر گرفته می‌شوند که البته خود سلول را نیز می‌توان در این مجموعه تعریف کرد. مشخصه دیگر یک اتومات سلولی، زمان یا پارامتری شبیه آن است که به صورت جزء به جزء (یا پله‌ای و یا گام زمانی)، تعریف می‌شود. در اتومات سلولی، معمولاً گام‌های زمانی یکسان و ثابت فرض می‌شود [۱۶].

تعریف وضعیت (حالت) برای سلول‌ها از دیگر ویژگی‌های مهم یک اتومات سلولی است. برای هر سلول در هر گام زمانی، یک وضعیت s ، از مجموعه وضعیت‌های از پیش تعریف شده S ، نسبت داده می‌شود (SES). مجموعه وضعیت‌های سلول نیز بسته به مورد استفاده اتومات سلولی تعریف می‌شود که این مجموعه معمولاً شامل اعضای گسسته است. حالت سلول‌ها به طور همزمان در سطوح زمانی گسسته به هنگام می‌شود [۱۶ و ۱۷].

در هر اتومات سلولی، قانون یا قوانینی حاکم است که اندرکنش بین هر سلول با همسایگانش را مشخص کرده و بر اساس آن، وضعیت یک سلول را در هر گام زمانی با توجه به وضعیت سلول‌های همسایه آن در مرحله قبل توصیف می‌کند. به عبارت دیگر، وضعیت هر سلول در هر گام زمانی بر اساس وضعیت‌های خود سلول و سلول‌های مجاور (همسایگانش) در گام زمانی قبل تغییر می‌کند. این تغییر به وسیله قوانین محلی حاکم بر اتومات سلولی مشخص می‌شود [۱۶ و ۱۷]. ساده بودن قوانین اتومات سلولی و سرعت بسیار بالای این روش در مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی، آن را به یک ابزار شبیه‌سازی بسیار قوی تبدیل کرده است [۱۶]. خواص پایه‌ای اتومات سلولی سنتی در بیشتر مطالعات انجام شده خیلی آزاد نیست. این موضوع بدین معناست که در اتومات سلولی سنتی از سلول‌هایی با اندازه و شکل یکسان، مشبندی منظم و با ساختار همسایگی یکسان استفاده می‌شود. اما در بعضی از موارد، پدیده مورد مطالعه دارای توزیعی ناهمگن است (مانند توزیع شکستگی‌های سنگی) و نمی‌توان برای مطالعه رفتار این موارد از اتومات سلولی منظم یا همان اتومات سلولی سنتی استفاده کرد. در اینگونه موارد می‌توان با استفاده از فرضیات زیر نتایج مفیدتری بدست آورد [۱۸]:

- اندازه و شکل سلول‌ها را متفاوت در نظر گرفت.
- ساختار شبکه را نامنظم در نظر گرفت.
- شکل (تعداد) همسایگی‌ها برای سلول‌های مختلف متغیر در نظر گرفت.
- در اتومات سلولی سنتی بر اساس تعریف مور و یا نیومن

تعداد همسایگی‌ها مشخصی است در حالی که در اتومات سلولی نامنظم تعداد همسایگی‌ها کاملاً متغیر است. برای مثال فلچ و هگسلمان (۲۰۰۱) یک شبکه نامنظم، (در ساختار و شکل سلول‌ها و تعداد همسایگی‌ها) را معرفی نمودند. در ساختار اتومات سلولی توسعه داده شده توسط این محققین، از یک دیاگرام ورونویی^۷ استفاده شده و همسایگان یک سلول به صورت سلول‌هایی تعریف شده که با سلول مورد نظر دارای ضلع مشترک باشند [۱۹].

۴ - توسعه الگوریتم اتومات سلولی نامنظم برای

شناسایی مسیره‌های اصلی جریان

با توجه به نامنظم بودن شکستگی‌های موجود در مدل DFN، برای به کارگیری روش اتومات سلولی لازم است که تغییراتی در ساختار روش سنتی اتومات سلولی اعمال شود. علاوه بر این تغییرات، بایستی قوانین انتقال و مفاهیم مربوط به وضعیت شکستگی‌ها (در اتومات سلولی) با توجه به مفاهیم توپولوژیکی شبکه شکستگی مجزا توسعه داده شوند. در این مقاله، اتومات سلولی نامنظم برای شبکه شکستگی دوبعدی توسعه داده شده که در این سیستم، شکستگی‌ها به صورت یک پاره خط تعریف می‌شوند. برای به کارگیری روش اتومات سلولی نامنظم، هر شکستگی به صورت یک شکستگی در نظر گرفته شده و اتومات سلولی نامنظم در دو فاز مختلف تعریف قوانین انتقال و تعیین حالت نهایی سلول‌ها تعریف شده است.

۴-۱ - تعریف سلول و همسایگی

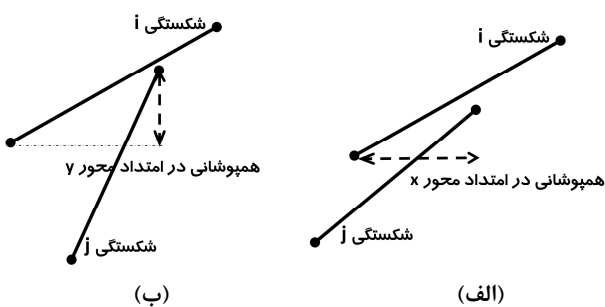
برای تعیین شکستگی‌های هادی با استفاده از روش اتومات سلولی گام اول تعریف سلول می‌باشد. در این تحقیق هر شکستگی به عنوان یک سلول در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هر شکستگی طول و جهت‌داری مختص به خود را دارد، این تعریف با تعریف همسایگی در اتومات سلولی نامنظم مطابقت دارد. در روش توسعه داده شده در این مقاله، همسایگی هر سلول (شکستگی) در مدل اتومات سلولی نامنظم به صورت زیر تعریف شده است:

یک سلول همسایه سلول دیگر است اگر و تنها اگر با سلول مورد نظر تقاطع داشته باشد. علاوه بر آن خود سلول مورد نظر نیز به عنوان همسایه خودش در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، برای تعیین همسایگی‌ها از روش حل دستگاه معادلات خطی، با الگوریتمی متفاوت استفاده شده است. به منظور کاهش زمان محاسبات، الگوریتم تعیین همسایگی هر سلول (شکستگی‌های متقاطع) با استفاده از روش حل دستگاه معادلات خطی (بهینه شده) توسعه داده شده است. با فرض

اینکه مختصات دو انتهای شکستگی‌ها مشخص است:
 - برای تمام شکستگی‌ها، مختصات شکستگی نام طوری مرتب می‌شود که مختصات X انتهای سمت راست آن از مختصات X انتهای سمت چپ بزرگتر باشد، یعنی $X_{Right(i)} > X_{Left(i)}$.
 - برای تمام شکستگی‌ها، شکستگی‌ها به صورتی مرتب می‌شوند که از بالا به پایین مختصات X انتهای سمت چپ آنها افزایش یابد، یعنی $X_{Left(i+1)} > X_{Left(i)}$.
 - دو شکستگی متقاطع هستند اگر و تنها اگر مختصات X آنها همپوشانی داشته باشد و مختصات Y آنها نیز در این بازه (بازه همپوشانی X) دارای اشتراک باشد. (شکل ۱).

اگر شکستگی‌های i و j دارای دو شرط مذکور باشند، معادله خط جفت شکستگی‌ها در یک دستگاه معادله خطی حل می‌شود، اگر شکستگی i با شکستگی j متقاطع باشد، یک عدد به تعداد همسایگی شکستگی‌های i و j اضافه شده و این شکستگی‌ها به عنوان همسایه یکدیگر ذخیره می‌شوند.

الگوریتم کلاسیک برای جستجو شکستگی‌های متقاطع در یک شبکه شکستگی متشکل از n شکستگی الگوریتمی با پیچیدگی n^2 یا $O(n^2)$ است که تمام جفت شکستگی‌ها را بررسی می‌کند [۲۰]. در الگوریتم ارائه شده در این مقاله، اگر میانگین طول شکستگی‌ها در راستای محور X را با l_1 ، میانگین طول شکستگی‌ها در راستای محور Y را با l_2 و ابعاد شبکه شکستگی را با L نشان دهیم، تعداد بررسی‌های تقاطع برای تمام شکستگی‌ها از مرتبه $n^2 l_1 l_2 / L^2$ است، به عبارت دیگر الگوریتم دارای پیچیدگی $O(n^2 l_1 l_2 / L^2)$ است. این الگوریتم نسبت به الگوریتم کلاسیک با پیچیدگی $O(n^2)$ با ضرب فاکتور $L^2 / l_1 l_2$ سریعتر است [۲۰].



شکل ۱: دو شکستگی الف) همپوشانی در امتداد محور X ، ب)

همپوشانی در امتداد محور Y

۴-۲ - تعریف مجموعه وضعیت سلول‌ها

در اتومات سلولی به هر سلول در هر گام زمانی، یک وضعیت S ، از مجموعه وضعیت‌های از پیش تعریف شده S ، نسبت داده می‌شود. تمام وضعیت‌هایی که ممکن است هر سلول در فرایند اجرای اتومات سلولی و در هر گام زمانی اختیار کند عبارتند از:

وضعیت F در شبکه شکستگی وجود داشته باشد. زمانی که تمام شکستگی‌ها دارای وضعیتی غیر از وضعیت F باشند اتومات سلولی وارد فاز دوم می‌شود. در فاز دوم تمام سلول‌هایی که وضعیت فعلی آنها غیر از وضعیت A باشد، به وضعیت D تغییر وضعیت می‌دهند. فاز دوم نیز تا زمانی ادامه می‌یابد که حداقل یک سلول با وضعیت O یا I در شبکه شکستگی وجود داشته باشد. در انتهای فاز دوم تمام سلول‌هایی که دارای وضعیت D هستند از شبکه شکستگی حذف شده و باقیمانده شکستگی‌ها مسیرهای اصلی جریان را تشکیل می‌دهند.

۵ - توسعه کد محاسباتی FICAF

برای مدل‌سازی جریان سیال ورودی به حفريات زیرزمینی کد محاسباتی تحت عنوان FICAF در محیط برنامه نویسی متلب توسعه داده شده است. روندنا کلی تولید شبکه شکستگی و تحلیل جریان در شکل (۲) نشان داده شده است.

در ابتدای روندنا با ورود داده‌های لازم شامل، تعداد دسته شکستگی‌های اصلی، فراوانی، توابع توزیع پارامترهای هندسی هر دسته شکستگی، ابعاد دامنه ناحیه مورد مطالعه و نظایر آنها، شبکه شکستگی مجزا تولید و هندسه فضای زیرزمینی مدل‌سازی می‌شود. بعد از ساخت شبکه شکستگی مجزا مسیرهای اصلی جریان با استفاده از مفاهیم اتومات سلولی نامنظم شناسایی شده و شبکه شکستگی‌های (شبکه شکستگی‌ای که در آن تمام شکستگی‌ها در تشکیل مسیر(های) اصلی جریان سیال نقش دارند) شناسایی می‌شود.

شکل (۳) مثالی از شبکه شکستگی مجزا و شبکه شکستگی‌های متناظر آن را که توسط کد محاسباتی FICAF مدل‌سازی شده است، نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل (۳) مشخص است، تعداد زیادی از شکستگی‌های موجود در شبکه شکستگی اولیه در تشکیل شبکه شکستگی‌های نقش ندارند. به عبارت دیگر این شکستگی‌ها در ایجاد مسیرهای اصلی جریان به حفريه زیرزمینی هیچ نقش نداشته و از نظر هیدرولیکی بی اثر هستند. حذف این شکستگی‌ها باعث افزایش سرعت و دقت محاسبات جریان می‌شود.

۶ - اعتبار سنجی کد محاسباتی FICAF

۶-۱ - توصیف مطالعه موردی و داده‌های ورودی

برای ارزیابی صحت عملکرد کد محاسباتی FICAF در شناسایی شبکه شکستگی‌های و مدل‌سازی جریان، دبی آب ورودی به مغار ترانسفورمر (TC) نیروگاه سد سیاه بیشه (که در استان مازندران در مسیر رودخانه چالوس واقع شده است) به عنوان یک مطالعه موردی، شبیه‌سازی و با مقادیر میدانی

$$S = \{A, F, I, i, O, o, D\} \quad (۴)$$

که در آن

A: بیانگر سلول فعال است. اگر سلولی دارای وضعیت A باشد، بدین معناست که در ایجاد شبکه شکستگی‌های نقش دارد.

F: بیانگر سلول آزاد است. اگر سلولی دارای وضعیت F باشد، بدین معناست که این سلول ممکن است در ایجاد شبکه شکستگی‌های نقش داشته باشد و یا نداشته باشد.

I: بیانگر سلولی است که مرز داخلی ناحیه مورد بررسی را قطع کرده است. اگر سلولی دارای وضعیت I یا I باشد، بدین معناست که این سلول ممکن است در ایجاد شبکه شکستگی‌های نقش داشته باشد و یا نداشته باشد.

i: بیانگر سلولی است که با یک یا چند واسطه به مرز درونی دامنه مورد مطالعه ارتباط دارد.

O: بیانگر سلولی است که مرز خارجی ناحیه مورد بررسی را قطع کرده است. اگر سلولی دارای وضعیت O یا O باشد، بدین معناست که این سلول ممکن است در ایجاد شبکه شکستگی‌های نقش داشته باشد و یا نداشته باشد.

o: بیانگر سلولی است که با یک یا چند واسطه به مرز بیرونی دامنه مورد مطالعه ارتباط دارد.

D: به معنای سلول غیر فعال است. اگر سلولی دارای وضعیت D باشد، بدین معناست که این سلول هیچ نقشی در ایجاد شبکه شکستگی‌های (و بنابراین انتقال سیال) ندارد.

با اجرای الگوریتم در شروع فاز اول اتومات سلولی (و در اولین گام زمانی) هر سلول تنها یکی از وضعیت‌های A, F, I یا O را دارد. به این صورت که اگر سلولی هم مرز داخلی و هم مرز خارجی را قطع کند دارای وضعیت A، اگر فقط مرز خارجی ناحیه مورد مطالعه را قطع کند دارای وضعیت O، اگر فقط مرز داخلی را قطع نماید وضعیت I و در غیر این صورت دارای وضعیت F خواهد بود.

۴-۳ - تعریف قوانین انتقال (گذار)

وضعیت هر سلول در هر گام زمانی بر اساس وضعیت‌های خود سلول و سلول‌های مجاور (همسایگانش) در گام زمانی قبل تغییر می‌کند. این تغییر به وسیله قوانین محلی حاکم بر اتومات سلولی مشخص می‌شود. قوانین انتقال در فاز اول و دوم اتومات سلولی به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. باید توجه شود که در شمارش حداقل یا حداکثر همسایگی در قوانین فاز اول و دوم، خود سلول نیز به عنوان همسایه خودش در نظر گرفته می‌شود.

فاز اول تا زمانی ادامه می‌یابد که حداقل یک سلول با

M2 و M3 و مجموعه شکستگی‌های تصادفی M4 در جدول (۳) نشان داده شده است [۱۴]. لازم به ذکر است، شکستگی‌های تصادفی موجود در توده سنگ از نظر مدل سازی هیدرولیکی بسیار مهم بوده و الزاما باید در محاسبات منظور شوند. در ادامه کار، از این مشخصات هندسی برای شبیه‌سازی شبکه شکستگی مجزا در توده سنگ دربرگیرنده مغار نیروگاه و مغار ترانسفورمر مربوط به پروژه تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه استفاده شده است.

مقایسه شده است.

ویژگی‌های هندسی شکستگی‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل، از برداشت‌های انجام شده روی دیواره‌های مغار نیروگاه بدست آمده است. در حدود ۷۳۸۰ شکستگی بر روی دیواره‌های مغار نیروگاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته که در نهایت تعداد سه دسته شکستگی اصلی M1، M2 و M3 و یک مجموعه شکستگی‌های تصادفی M4 به عنوان الگوی شکستگی داری توده سنگ درونگیر مغار نیروگاه در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی سه دسته شکستگی اصلی M1،

جدول ۱: تعریف قوانین انتقال در فاز اول

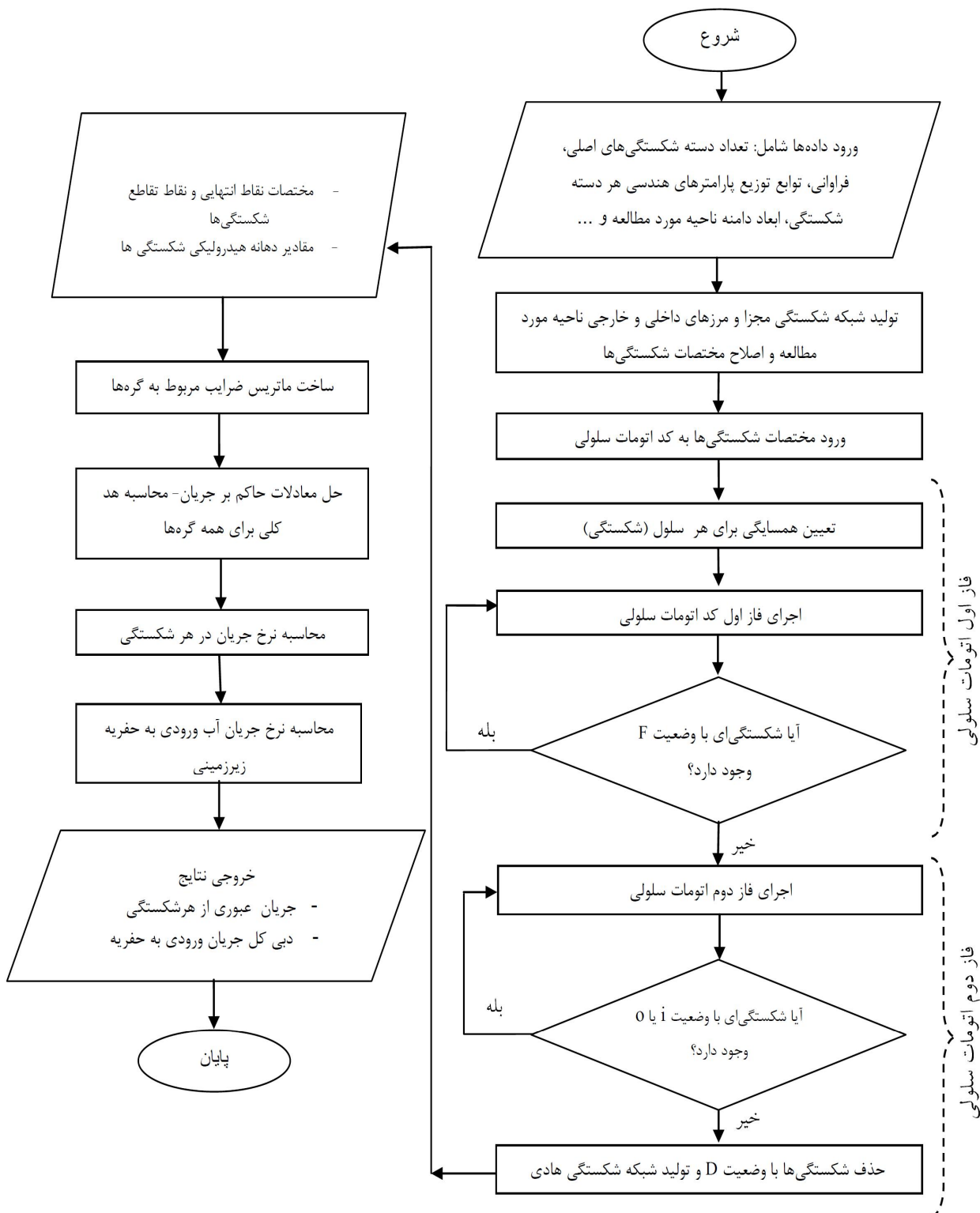
قانون انتقال اتومات سلولی	وضعیت سلول در گام زمانی t
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت O یا 0 باشد در گام زمانی بعدی وضعیت 0 خواهد داشت.	F
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت I یا I باشد در گام زمانی بعدی وضعیت I خواهد داشت.	F
اگر سلول دارای حداقل یک همسایگی با وضعیت 0 یا O و حداقل یک همسایگی با وضعیت I یا I باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	F
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت A باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	F
اگر سلول حداکثر دو همسایگی داشته باشد در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	F
اگر تمام همسایگان سلول دارای وضعیت F باشد در گام زمانی بعدی وضعیت سلول تغییر نخواهد کرد.	F
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت A باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	o
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت I یا I باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	O یا o
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت A باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	i
اگر حداقل یکی از همسایگان سلول دارای وضعیت 0 یا O باشد در گام زمانی بعدی وضعیت A خواهد داشت.	I یا i
اگر وضعیت فعلی سلول A باشد، در گام زمانی بعدی وضعیت سلول تغییر نخواهد کرد.	A
اگر سلول حداکثر دارای یک همسایگی باشد، در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	O
اگر سلول حداکثر دارای یک همسایگی باشد، در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	I

جدول ۲: تعریف قوانین انتقال در فاز دوم

قانون انتقال اتومات سلولی	وضعیت سلول در گام زمانی t
اگر وضعیت فعلی سلول I باشد در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	i
اگر وضعیت فعلی سلول I باشد در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	o
اگر سلول حداکثر دارای یک همسایگی باشد، در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	I
اگر سلول حداکثر دارای یک همسایگی باشد، در گام زمانی بعدی وضعیت D خواهد داشت.	O
در سایر حالات سلول وضعیت خود را حفظ خواهد کرد	

تحلیل جریان در شبکه شکستگی هادی

مدل سازی شبکه شکستگی مجزا و شناسایی مسیر(های) اصلی جریان

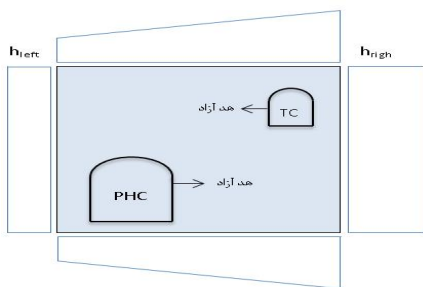


شکل ۲: روند نما کلی ساخت شبکه شکستگی مجزا و شبکه شکستگی هادی مربوط به آن و تحلیل جریان در کد محاسباتی FICAF

جدول ۳: مشخصات آماری جهت داری و طول رخنون دسته شکستگی‌های اصلی در محدوده مغار نیروگاه [۱۴]

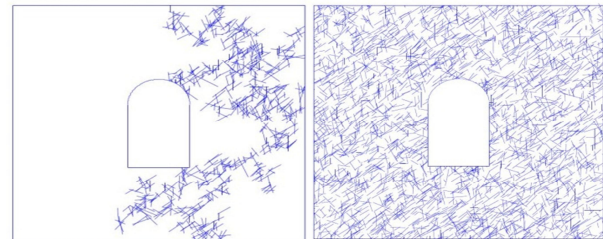
دسته شکستگی				مشخصات آماری
M4	M3	M2	M1	
۲۶/۷٪	۱۱/۸٪	۲۳/۶٪	۳۷/۸٪	فراوانی نسبی (٪)
--	۵۷/۱۹۸	۶۳/۳۱۵	۵۷/۰۱۶	شیب / جهت شیب (درجه/درجه)
--	۱۶/۳۴	۲/۶۴	۱۲/۳۴	ثابت فیشر (k)
۰/۱۴۴	۰/۰۶۳	۰/۱۲۹	۰/۲۰۷	فراوانی شکستگی داری در واحد سطح
۱/۰۰	۱/۰۲	۰/۹۳	۰/۹۳	میانگین طول رخنمون (متر)
۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۴۴	انحراف استاندارد طول رخنمون (متر)

که مغار نیروگاه با عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۴۰ متر در گوشه پایین و سمت چپ و مغار ترانسفورمر با عرض ۱۶ متر و ارتفاع ۲۸ متر در گوشه بالا و سمت راست دامنه مدل‌سازی شده است (شکل ۵). برای ساخت شبکه شکستگی در داخل دامنه از داده‌های میدانی جداول (۳) استفاده شده است. سه دسته شکستگی اصلی، M1، M2، M3 و مجموعه شکستگی‌های تصادفی M4 به طور جداگانه در داخل ناحیه ساخته شده است. در این مطالعه، ۵۰۰ مدل هندسی متفاوت برای شبکه شکستگی اطراف مغارها شبیه‌سازی شده است. بعد از ساخت شبکه‌های شرایط مرزی به مدل اعمال و معادلات جریان برای شبکه شکستگی‌های حل می‌شود. برای مرزهای داخلی (دیواره‌های مغار) شرط مرزی جریان آزاد، و برای مرزهای خارجی شرط مرزی با هد معلوم در نظر گرفته شده است (شکل ۵).



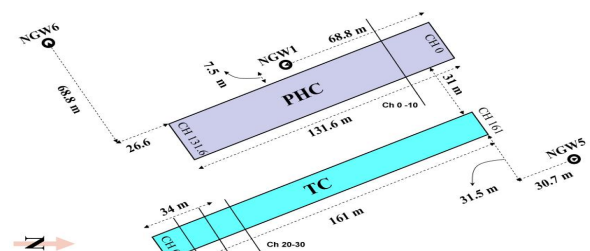
شکل ۵: شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای تحلیل جریان ورودی به مغار نیروگاه و ترانسفورمر

مقادیر هد کلی برای مرزهای عمودی ثابت و برای مرزهای افقی به صورت خطی تغییر می‌کند. مقادیر h_{right} و h_{left} در



شکل ۳: (الف)، شبکه شکستگی مجزا در اطراف حفریه زیرزمینی و (ب)، شبکه شکستگی‌های (مسیرهای اصلی جریان)

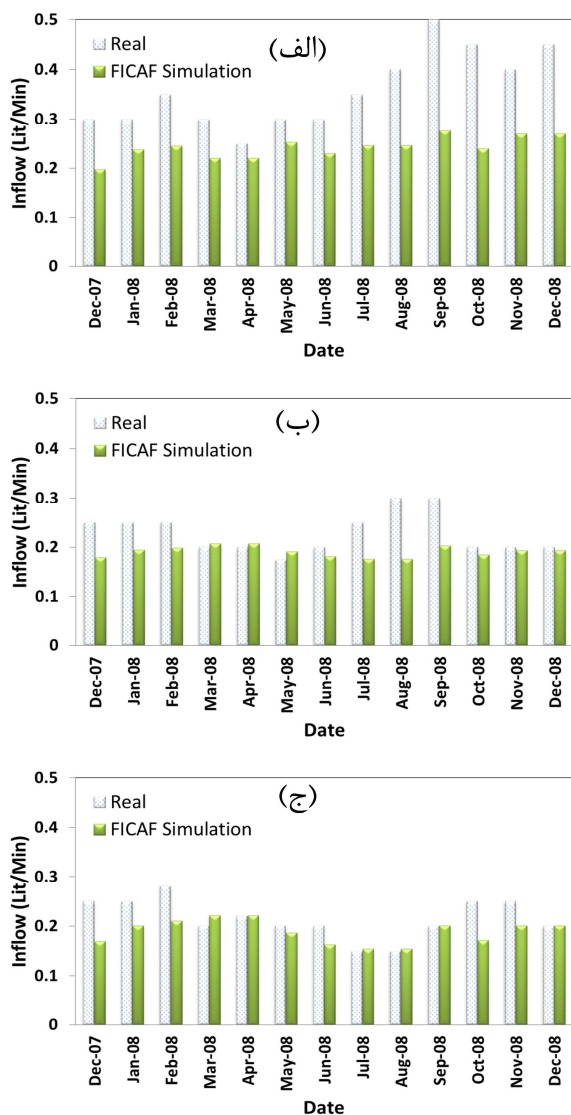
برای تعیین وضعیت آب زیرزمینی در محدوده مغارها و برآورد سطح آب زیرزمینی سه گمانه NGW1، NGW5 و NGW6 در محدوده طرح در نظر گرفته شده است که موقعیت این گمانه‌ها نسبت به محل مغار نیروگاه و ترانسفورمر در شکل (۴) نشان داده شده است. با استفاده از پیژومترهای نصب شده در این گمانه‌ها سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی مختلف و در طول ماه‌های مختلف سال قرائت شده است. از داده‌های این گمانه‌ها به منظور بدست آوردن شرایط مرزی برای مدل‌سازی جریان آب ورودی به درون مغارها استفاده شده است [۱۴].



شکل ۴: موقعیت مغارهای نیروگاه (PHC) و ترانسفورمر (TC)، گمانه‌های پیژومتریک و مقاطع Ch [۱۴]

۶-۲- شبیه‌سازی جریان آب ورودی به مغارها

برای شبیه‌سازی جریان ورودی به درون مغارها، از یک دامنه جریان با عرض ۱۲۲ متر و ارتفاع ۱۳۰ متر استفاده شده است



شکل ۶: مقادیر واقعی و شبیه‌سازی مربوط به جریان آب ورودی به مغار ترانسفورمر برای دهانه هیدرولیکی ۰/۴۵۷ میلی‌متر، (الف) مقطع ۰-۱۰ (ch)، (ب) مقطع ۱۰-۲۰ (ch)، (ج) مقطع ۲۰-۳۰ (ch)

در ادامه، با استفاده از مفاهیم اتومات سلولی نامنظم، مسیرهای اصلی جریان سیال به درون حفریه زیرزمینی (شبکه شکستگی هادی) را شناسایی و در نهایت جریان سیال به درون حفریه زیرزمینی را در این شبکه شکستگی هادی محاسبه می‌کند.

در نظر گرفتن رفتار ناپیوسته شکستگی‌ها بر خلاف مدل‌های پیوسته، منجر به ارائه مدل‌های دقیق‌تر، کاهش خطای مدل‌سازی، افزایش ایمنی و کاهش عدم قطعیت رفتار توده‌سنگ می‌شود. با این وجود، حجم محاسبات در روش مدل‌سازی DFN بسیار زیاد بوده (به خصوص برای مسائل بزرگ مقیاس)

شکل (۵) مقادیر هد معلوم هستند که با استفاده از داده‌های میدانی برداشت شده از گمانه‌های پیزومتریک در محدوده مغارها محاسبه شده است. برای تخصیص دهانه هیدرولیکی شکستگی‌های موجود در دامنه شبیه‌سازی، از نتایج کالیبراسیون و مقدار دهانه هیدرولیکی ۰/۴۵ میلی‌متر استفاده شده است [۹].

شبیه‌سازی جریان ورودی به مغار برای بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ انجام شده است. از ۵۰۰ مدل هندسی ساخته شده ۴۵۷ مدل دارای شبکه شکستگی هادی بوده‌اند. اتومات سلولی در مدت زمان بسیار کمی و با دقت بسیار بالایی شبکه شکستگی هادی را شناسایی می‌کند. برای ۴۵۷ مدلی که دارای شبکه شکستگی هادی بودند شرایط مرزی مختلف اعمال شده و مقادیر جریان ورودی به درون مغار نیروگاه اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این مقدار دهانه هیدرولیکی، جریان آب ورودی به مغار ترانسفورمر، برای سه مقطع مختلف شامل ۰-۱۰ Ch، ۱۰-۲۰ Ch و ۲۰-۳۰ Ch (شکل ۵) شبیه‌سازی، و نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده، نتایج شبیه‌سازی جریان آب ورودی به داخل مغار ترانسفورمر انطباق مناسبی را با نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. بهترین انطباق بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری جریان آب ورودی به مغار ترانسفورمر برای مقطع ۲۰-۳۰ Ch بدست آمده است. برای نشان دادن کیفیت انطباق بین نتایج، متوسط خطای بین دبی جریان آب ورودی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده محاسبه شد که این مقادیر متوسط خطا برای مقاطع ۰-۱۰ Ch، ۱۰-۲۰ Ch، ۲۰-۳۰ Ch به ترتیب برابر با ۱۷٪، ۳۰٪ و ۱۳٪ بدست آمده است.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، از ترکیب روش اتومات سلولی نامنظم با مدل DFN برای مطالعه جریان آب ورودی به درون حفريات زیرزمینی استفاده شده است. هدف از به کارگیری این، افزایش سرعت محاسبات در مدل DFN بوده است. بدین منظور، یک کد محاسباتی تحت عنوان FICAF بر پایه مبانی اتومات سلولی توسعه داده شده است. این کد محاسباتی، با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو از توابع توزیع احتمالاتی ویژگی‌های هندسی شکستگی‌ها، مدل‌های DFN دوبعدی را تولید می‌کند.

- [9] Sharifzadeh, M., Javadi, M.; 2011; "Near-Field Application of Aperture Back Calibrated Distinct Fracture Network"; Published at 12th International Congress on Rock Mechanics. October 19-22, 2011. China. Pages: 1361-1365.
- [10] Rouleau, A., Gale, J.E.; 1987; "Stochastic Discrete Fracture Simulation of Groundwater Flow into an Underground Excavation in Granite"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 24(2), 99-112.
- [11] Bear J., Tsang C.F., Marsily G.De.; 1993; "Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock"; Academic Press, San Diego, First Edition.
- [12] Min, K.-B., Jing, L., Stephansson, O.; 2004; "Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: Method and application to the field data from Sellafield, UK"; Hydrogeology Journal, 12, 497-510.
- [13] Prist, S.; 1993; "Discontinuity analysis of rock engineering"; CHAPMAN & HALL, London. 473 P.
- [14] Javadi, M.; 1388; "Modeling of Water Flow in Rock Mass Using Statistical Method- Case Study of Siah Bisheh Powerhouse"; M.Sc. Thesis, Amirkabir university of technology.
- [15] Wolfram, S.; 1984; "Universality and Complexity in Cellular Automata"; Physica. D, 10, 1-35.
- [16] Clarridge, A.; 2009; "Cellular Automata: Algorithms and Applications"; Master of Science thesis. Queen's University.
- [17] Kari, J.; 2005; "Theory of Cellular Automata: a Survey"; Theoretical Computer Science, 334, 3-33.
- [18] Baran, J., Petrovic, P., Schoenauer, M.; 2010; "Cellular Automata with Irregular Structure: a Compact Representation"; Spatial Computing Workshop 2010 at SASO'10, Budapest, Sept. 27.
- [19] Flache, A., Hegselmann, R.; 2001; "Do Irregular Grids Sake a Difference? Relaxing the Spatial Regularity Assumption in Cellular Models of Social Dynamics"; Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 4, no. 4.
- [20] Garey, M.R., Johnson, D.S.; 1983; "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness"; New York: W. H. Freeman.

زیر نویس ها

- ¹ Discrete Fracture Network
- ² Near Field
- ³ Fracture Network – Irregular Cellular Automata- Fluid Flow Modeling
- ⁴ Irregular Cellular Automata
- ⁵ Connected Fracture Network
- ⁶ Node Conductance
- ⁷ Voronoi

که در نتیجه به کارگیری عملی این روش برای مسائل واقعی نیازمند استفاده از ابزارهایی برای افزایش سرعت محاسبات است. در این مقاله، از قابلیت روش اتومات سلولی نامنظم برای افزایش سرعت محاسبات استفاده شده است. این روش برای شناسایی مسیر(های) اصلی جریان در هر شبکه شکستگی مجزا دو بعدی و با هر تعداد (دسته) شکستگی به راحتی قابل کاربرد است. برای اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده، تعداد ۵۰۰ مدل هندسی DFN با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به مغارهای زیرزمینی پروژه تلمبه ذخیره ای سیاه بیشه مدل-سازي شد. تعداد ۴۵۷ مدل دارای شبکه شکستگی هادی بودند، به عبارت دیگر ۹۱/۴ درصد از مدل‌های DFN ساخته شده تراوا بودند. برای این ۴۵۷ مدل محاسبات جریان آب ورودی به مغار ترانسفورمر با استفاده از دهانه هیدرولیکی ۰/۴۵ میلی‌متر انجام شد. نتایج حاصل از شبیه سازی با مقادیر دبی جریان آب ورودی به داخل مغار با هم مقایسه شد که انطباق مناسبی بین نتایج بدست آمد. مقایسه نتایج مدل‌سازی جریان ورودی به مغار ترانسفورمر سد سیاه بیشه با استفاده از کد محاسباتی FICAF با مقادیر واقعی کارآیی روش اتومات سلولی در شناسایی و تولید شبکه شکستگی هادی و تحلیل جریان را نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Goodman, R., Moye, D., Schalkwyk, A., Javandel, I.; 1965; "Groundwater inflow during tunnel driving"; Eng. Geol. 1, 150-162.
- [2] Kolymbas, D., Wagner, P.; 2007; "Groundwater ingress to tunnels – The exact analytical solution"; Tunn. Undergr. Space Technol., 22, 23-27.
- [3] Tal, A., Dagan, G.; 1983; "Flow Toward Storage Tunnels Beneath a Water Table: 2. Three-Dimensional Flow"; Water Resour. Res., 20(9), 1216-1224.
- [4] Or, D., Tuller, M., Fedors, R.; 2005; "Seepage into drifts and tunnels in unsaturated fractured rock"; Water Resour. Res., 41, W05022, doi:10.1029/2004WR003689
- [5] Li, D., Li, X., Li, C.C., Gong, F., Huang, B., Gong, F., Zhang, W.; 2009; "Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage"; Tunn. Undergr. Space Technol. 24, 260-268.
- [6] Ivars, D.M.; 2006; "Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, 705-725.
- [7] Fernandez, G., Moon, J.; 2010; "Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel – Part 1: Guideline for estimate of ground water inflow rate"; Tunn. Undergr. Space Technol. 25, 560-566.
- [8] Dverstorp, B., Andersson, J.; 1989; "Application of the Discrete Fracture Network Concept With Field Data: Possibilities of Model Calibration and Validation"; Water Resour. Res., 25(37), 540-550.