

تأثیر نوع مواد پرکننده بر مقاومت ناپیوستگی های مصنوعی دارای جهت یافتگی مختلف تحت تنش های سه محوری

هادی مختاریان^۱، حسن مومیوند^{۲*}

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن دانشگاه ارومیه hadi.mokhtarian@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه ارومیه دانشکده فنی گروه معدن، h.moomivand@urmia.ac.ir

(دریافت ۲۰ آذر ۱۳۹۱، پذیرش ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

ناپیوستگی ها به دو صورت پر شده و پر نشده وجود دارند. ناپیوستگی های پر شده بخش عظیمی از ناپیوستگی ها را شامل می شوند. مواد پرکننده دهانه ناپیوستگی ها دارای ترکیبات مختلف و در نتیجه مقاومت های مختلفی هستند. طی تحقیقاتی که به عمل آمده، ترکیب گچ با سایر مواد پرکننده همچون ماسه و خاک رس می تواند ماده مدل مناسبی به عنوان مواد پرکننده دهانه ناپیوستگی ها باشد. با استفاده از ترکیب گچ، ماسه، خاک رس و آب به نسبت های وزنی مختلف، سه نوع ماده مدل پرکننده دارای مقاومت فشاری یک محوری (σ_c) به ترتیب ۰/۶۱۶، ۲/۲۰۳ و ۳/۹۲۰ مگاپاسکال آماده سازی شد. تأثیر سه نوع ماده پرکننده در مقاومت محوری (σ_1) نمونه های دارای ناپیوستگی با جهت یافتگی به ترتیب ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه تحت فشارهای جانبی (σ_3) از ۰ تا ۲۰ مگاپاسکال طی انجام تعداد ۱۸۰ آزمایش مقاومت فشاری سه محوری مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه هایی که جهت یافتگی ناپیوستگی های آنها دارای زاویه ۰ و ۹۰ درجه، شکست در قطعات سنگ سالم اتفاق افتاد اما مقاومت محوری کمتر از مقاومت محوری سنگ سالم حاصل شد و ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر خرد شدگی بیشتری نشان داد. مقاومت محوری به ترتیب برای زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه کاهش یافت و شکست در صفحه ناپیوستگی ها اتفاق افتاد، طوری که برای ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر شکست در ماده پرکننده و برای ماده پرکننده دارای مقاومت بیشتر شکست در صفحه تماس دیواره ناپیوستگی با ماده پرکننده اتفاق افتاد. کاهش مقاومت محوری به عنوان تابعی از جهت یافتگی ناپیوستگی ها برای زوایای بین ۳۰ تا ۹۰ درجه با افزایش فشار جانبی ناچیز نشان داد. نوع مواد پرکننده در فشارهای جانبی کم در مقاومت محوری تأثیر بارزی نشان نداد اما مقاومت محوری (σ_1) با افزایش مقاومت یک محوری (σ_c)، زاویه اصطکاک و درصد ماسه مواد پرکننده دهانه ناپیوستگی ها در فشارهای جانبی بالا افزایش یافت. در کلیه حالات نتایج تجربی مقاومت محوری عموماً کمتر از مقاومت محوری در تئوری جیگر نشان داد.

کلمات کلیدی

مواد پرکننده، ناپیوستگی، سنگ، مقاومت، تنش، سه محوری

۱- مقدمه

توده سنگ یک جسم همگن، همسانگرد و پیوسته نیست و دارای انواع ناپیوستگی ها است. ناپیوستگی در توده سنگ به دو صورت پر شده و فاقد مواد پرکننده وجود دارند. مواد پرکننده باعث جدایش دیواره های ناپیوستگی ها می شوند. ناپیوستگی های پر شده بخش عظیمی از ناپیوستگی ها را شامل می شوند. در مورد تأثیر برخی ویژگی های ناپیوستگی ها همچون جهت یافتگی در مقاومت و معیار شکست سنگ درزه دار تحت تنش های سه محوری تحقیقات متعددی انجام شده است [۵-۱]. اما هنوز تأثیر مواد پرکننده از جنس طبیعت در مقاومت آنها تحت تنش های سه محوری مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی تأثیر مواد پرکننده بر مقاومت ناپیوستگی های دارای جهت یافتگی مختلف تحت تنش های سه محوری به عنوان موضوعی جدید می تواند اطلاعات بنیادی مفیدی حاصل نماید و برای درک و قضاوت صحیح در تحلیل پایداری و در نتیجه طراحی درست سازه های سنگی بی شماری که در آنها ناپیوستگی ها از موادی در طبیعت پر شده اند، مفید باشد. به علت تنوع مواد پرکننده که دارای مقاومت های مختلفی هستند، نیاز به یک راه کار مستدل و جامعی است که ویژگی های مقاومتی مواد پرکننده را بتوان به صورت انعطاف پذیر تغییر داد. طی تحقیقات وسیعی که در خصوص ماده مدل در مکانیک سنگ به عمل آمده، ترکیب گچ با سایر مواد پرکننده همچون ماسه می تواند ماده مدل مناسبی نسبت به سایر مواد باشد [۱۱-۶] در این تحقیق تأثیر سه نوع ماده پرکننده دارای ترکیبات گچ، ماسه و خاک رس دارای مقاومت های مختلف در مقاوت محوری نمونه های سنگ دارای ناپیوستگی با جهت یافتگی مختلف تحت تنش های سه محوری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- آماده سازی و آزمایش نمونه ها

ترکیبات گچ، ماسه و خاک رس که بیشتر شبیه مواد طبیعی بوده و برای مدل سازی مواد در طبیعت به ویژه مواد پرکننده دهانه ناپیوستگی ها مناسب تر بوده انتخاب شدند. درصد های مختلف گچ، ماسه و خاک رس و آب مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت سه نوع ماده پرکننده دارای ترکیبات گچ، ماسه، خاک رس و آب مطابق جدول (۱) تهیه گردید. دانه بندی ماسه مورد استفاده نیز در جدول (۲) نشان داده شده

است. نمونه های استاندارد استوانه ای [۱۲] از ملات حاصل از سه نوع ماده پرکننده دارای ترکیبات مطابق جدول (۱) آماده سازی شدند. چنین نمونه هایی پس از خشک شدن طی حدود دو هفته در دمای معمولی آزمایشگاه به حداکثر مقاومت خود می رسند [۶]. مقاومت فشاری یک محوری نمونه های استوانه ای پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه طی دو هفته در فصل تابستان بر اساس استاندارد [۱۲] اندازه گیری شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری یک محوری سه نوع ماده پرکننده مورد استفاده دهانه ناپیوستگی ها در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین به منظور تعیین زاویه اصطکاک (ϕ_j) و مقاومت چسبندگی (C_j)، مقاومت برشی سه گروه ناپیوستگی های آماده سازی شده از سنگ آهک پر شده با سه نوع ماده پرکننده دارای ضخامت ۶ میلی متر در آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد [۱۳] اندازه گیری شد. زاویه اصطکاک و مقاومت چسبندگی ناپیوستگی های پر شده حاصل از برش مستقیم نیز در جدول (۳) نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر مواد پرکننده بر معیار شکست ناپیوستگی های دارای جهت یافتگی مختلف تحت تنش های سه محوری، نمونه های سنگ آهک استوانه ای تهیه شده بر اساس استاندارد با زوایای ناپیوستگی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به حالت افقی به منظور استقرار مواد پرکننده در دهانه آنها آماده سازی شدند (شکل های ۱ و ۲). سپس ملات ماده مدل دارای ترکیبات و مقاومت های مختلف جهت قرار دادن در دهانه ناپیوستگی آماده سازی شد. تعداد ۵ بخش مختلف نمونه های دارای ناپیوستگی با زاویه جهت یافتگی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ از سنگ آهک با اره الماسه در آزمایشگاه مکانیک سنگ آماده سازی شد. دهانه ناپیوستگی ها در هر بخش در سه گروه با سه نوع ماده پرکننده دارای مقاومت های به ترتیب ۰/۶۱۶، ۲/۲۰۳ و ۳/۹۲۰ مگاپاسکال به ضخامت ۶ میلی متر پر گردید (شکل، ۳). تحقیقات قبلی مقاومت برشی مستقیم روی نمونه های دارای شکل، اندازه و زبری سطح دیواره مختلف دارای مواد پرکننده به ضخامت ۶ میلی متر نشان داد که شکل، اندازه و زبری سطح دیواره در مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک مؤثر نیست، چون دیواره ناپیوستگی ها پس از پر شدن با هم در تماس نبودند [۱۴]. پس از خشک شدن نمونه ها، مقاومت آنها در آزمایش فشاری سه محوری تحت فشار جانبی ۰ تا ۲۰ مگاپاسکال بر اساس استاندارد اندازه گیری شد [۱۵]-[۱۶].

شکست در قطعات سنگ سالم در نمونه هایی که جهت یافتگی ناپیوستگی های آنها دارای زاویه ۰ درجه اتفاق افتاد (شکل، ۴). اما ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر خرد شدگی بیشتر پیدا کرد. برای جهت یافتگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

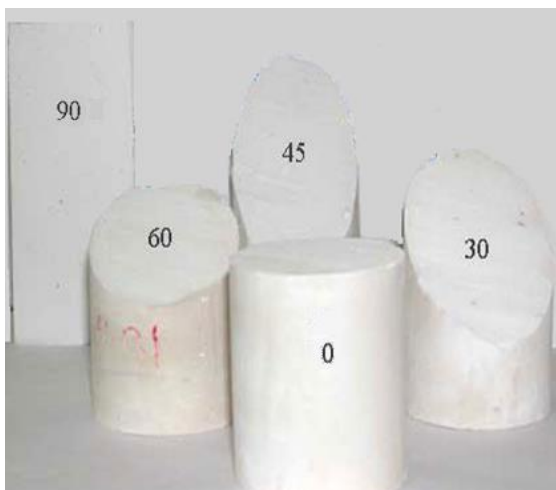
جدول ۳: مقاومت فشاری یک محوری مواد مدل و زاویه اصطکاک (ϕ) و مقاومت چسبندگی (C) سه نوع مواد مدل پرکننده

دهانه ناپیوستگی

زاویه اصطکاک ناپیوستگی (ϕ) پرسیده با ماده مدل (درجه)	مقاومت چسبندگی (C) ناپیوستگی پر شده با ماده مدل (MPa)	متوسط مقاومت فشاری یک محوری (MPa)	ماده پر کننده
۴۳/۵۲	۰/۱۰۶	۰/۶۱۶	F1
۳۸/۹	۰/۲۷۸	۲/۲۰۳	F2
۵۲/۴۳	۰/۱۷۰	۳/۹۲۰	F3



شکل ۱: بخشی از نمونه های آماده سازی شده بر اساس استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ (۱۹۷۹)



شکل ۲: نمونه ای از ناپیوستگی ایجاد شده دارای زوایای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه

شکست در صفحه ناپیوستگی ها اتفاق افتاد (شکل، ۵، ۶، و ۷). برای ماده پرکننده دارای مقاومت یک محوری بیشتر شکست در محل صفحه تماس دیواره ناپیوستگی با ماده پرکننده اتفاق افتاد (شکل های، ۶ و ۷) اما برای ماده پرکننده دارای مقاومت یک محوری کمتر شکست در ماده پرکننده حاصل شد (شکل، ۵). در نمونه های دارای جهت یافتگی ناپیوستگی برابر ۹۰ درجه با جهت افقی، شکست در قطعات سنگ سالم اتفاق افتاد (شکل، ۸) و ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر خرد شدگی بیشتر پیدا کرد.

جدول ۱: درصد وزنی اجزا تشکیل دهنده مواد پر کننده دهانه ناپیوستگی ها

ماده پر کننده	درصد وزنی اجزا تشکیل دهنده نسبت به وزن کل آب، گچ، رس و ماسه			
	خاک رس (%)	ماسه (%)	گچ (%)	آب (%)
F1	۱۶/۶۶	۳۳/۳۳	۱۶/۶۶	۳۳
F2	۲۵	۰	۳۷/۵	۳۷/۵
F3	۰	۴۰	۳۰	۳۰

جدول ۲: درصد وزنی دانه بندی ماسه مورد استفاده مواد پر کننده دهانه ناپیوستگی ها

ردیف	دانه بندی	درصد وزنی عبور کرده
۱	الک ۲/۳۶ میلی متر	۱۰۰
۲	الک ۱/۱۸ میلی متر	۹۰
۳	الک ۰/۶ میلی متر	۴۶/۲
۴	الک ۰/۳ میلی متر	۱۷/۵
۵	الک ۰/۱۵ میلی متر	۴/۳



شکل ۶: شکست در صفحه تماس بین دیواره ناپیوستگی و ماده پرکننده دارای مقاومت بیشتر برای جهت یافتگی ۴۵ درجه با حالت افقی



شکل ۳: نمونه های دارای ناپیوستگی با جهت یافتگی مختلف و پر شده از ماده مدل



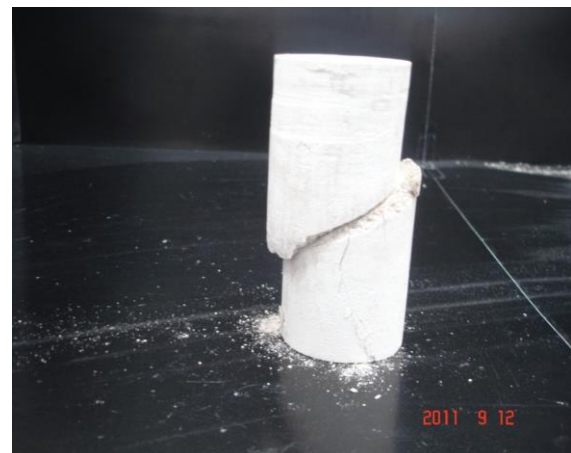
شکل ۷: شکست در صفحه تماس بین دیواره ناپیوستگی و ماده پرکننده دارای مقاومت بیشتر برای جهت یافتگی ۶۰ درجه



شکل ۴: شکست در بدنه سالم نمونه دارای ناپیوستگی پر شده با جهت یافتگی ۰ درجه نسبت به حالت افقی



شکل ۸: شکست در بدنه سالم نمونه دارای ناپیوستگی پر شده با جهت یافتگی ۹۰ درجه با حالت افقی



شکل ۵: شکست در راستای صفحه ناپیوستگی با جهت یافتگی ۳۰ درجه با حالت افقی و ماده پرکننده

۳- تأثیر ماده پرکننده و جهت یافتگی ناپیوستگی ها در

مقاومت سنگ تحت تنش های سه محوری

رابطه بین مقاومت محوری (σ_1) و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها نسبت به حالت افقی (α) تحت فشارهای جانبی مختلف برای نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری روی نمونه های دارای مواد پرکننده با مقاومت های مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی پر شده تحت فشار های جانبی مختلف برای سه نوع ماده پرکننده دارای مقاومت های ۰/۶۱۶ ، ۲/۲۰۳ و ۳/۹۲۰ مگاپاسکال به ترتیب در شکل های (۹، ۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. با افزایش زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها (α) از مقدار ۰ تا ۳۰ درجه، مقاومت محوری (σ_1) تحت فشار جانبی ثابت به مقدار خیلی کم کاهش می یابد. با افزایش زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی های پر شده از مقدار ۳۰ تا ۴۵ و ۶۰ درجه مقاومت محوری به شدت کاهش می یابد و در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی های پر شده برابر ۶۰ درجه حداقل می گردد. با افزایش زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی های پر شده از مقدار ۶۰ تا ۹۰ درجه مقاومت محوری افزایش می یابد.

با افزایش فشار جانبی میزان تأثیر زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی های پر شده (α) کاهش می یابد. علت آن چنین می تواند باشد که ناپیوستگی ها حتی به صورت پر شده تحت مقدار تنش های بالا مقاومت بیشتری از خود نشان می دهند و مقاومت سنگ دارای ناپیوستگی به مقاومت سنگ سالم نزدیک می شود. مقاومت محوری در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی ها برابر ۰ و ۹۰ درجه کمتر از مقاومت محوری سنگ سالم است. این نشان می دهد که وجود ناپیوستگی ها در هر شرایطی حتی در جهت عمود بر تنش های اصلی حداکثر و حداقل نیز باعث کاهش مقاومت می گردد. نتایج تأثیر سه نوع مواد پرکننده دارای ترکیب مختلف در مقاومت محوری نمونه های دارای ناپیوستگی های با جهت یافتگی مختلف تحت فشارهای جانبی متعدد در شکل (۱۲) با هم مقایسه شده اند. در فشارهای جانبی کم تأثیر سه نوع مواد پرکننده دارای ترکیبات مختلف، مقاومت های یک محوری و چسبندگی و زاویه اصطکاک مختلف در مقاومت محوری (σ_1) تحت تنش سه محوری

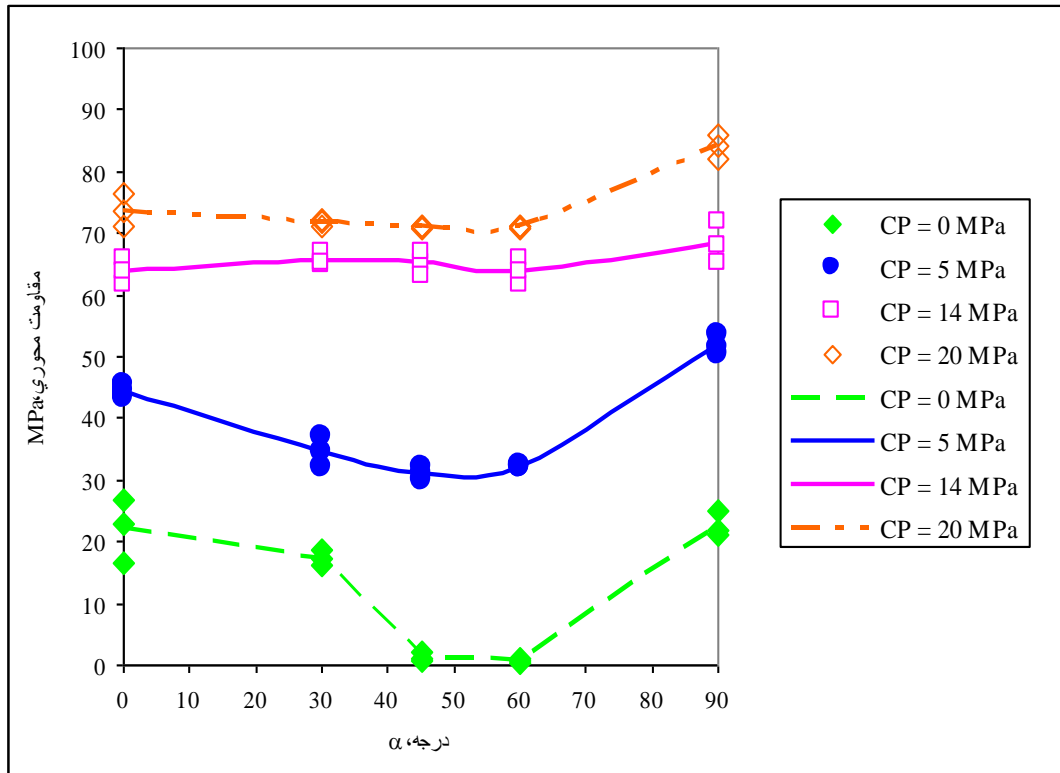
حدوداً شبیه یکدیگر هستند. اما با افزایش فشار جانبی، مقاومت محوری (σ_1) نمونه هایی که ماده پرکننده دهانه ناپیوستگی های آنها دارای مقاومت یک محوری، زاویه اصطکاک و درصد ماسه بیشتری است، بیشتر است. بنابراین نوع ترکیب ماده پرکننده و ویژگی های مکانیکی آن همچون مقاومت یک محوری و زاویه اصطکاک در تنش های بالاتر مؤثرتر هستند.

۴- تحلیل نتایج با استفاده از معیار شکست جیگر

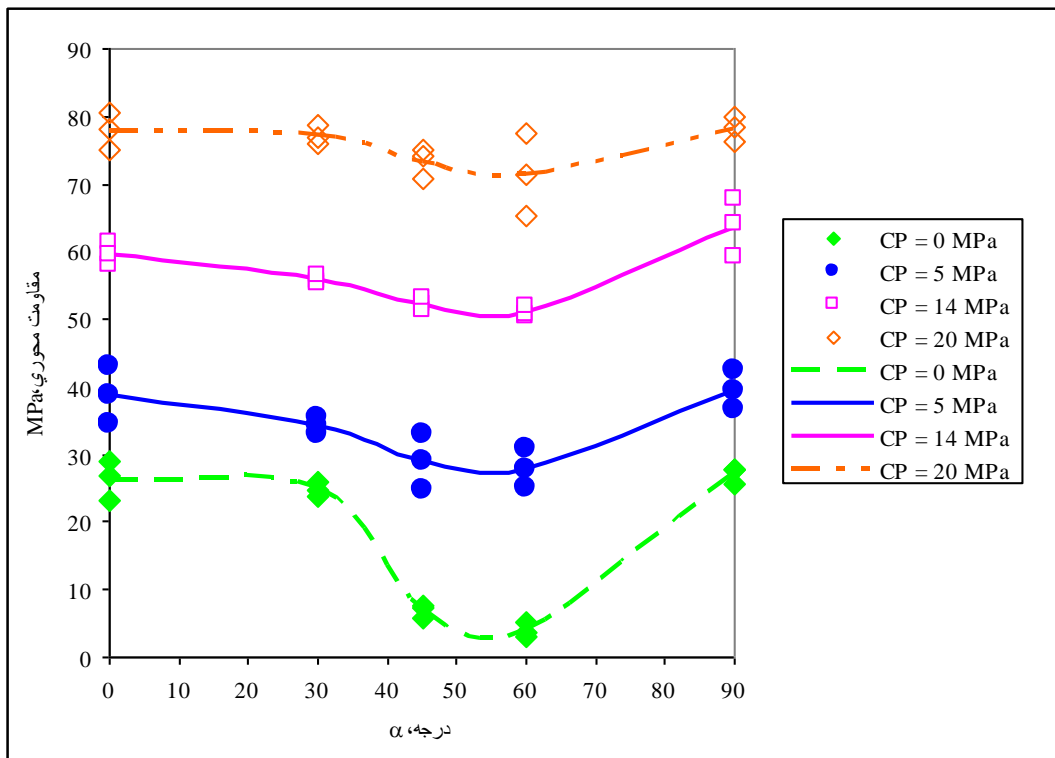
رابطه بین مقاومت محوری (σ_1) و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی (α) تحت فشار جانبی (σ_3) ثابت به شرح زیر توسط جیگر [۱] ارائه شده است.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \phi_j)}{(1 - \tan \phi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (1)$$

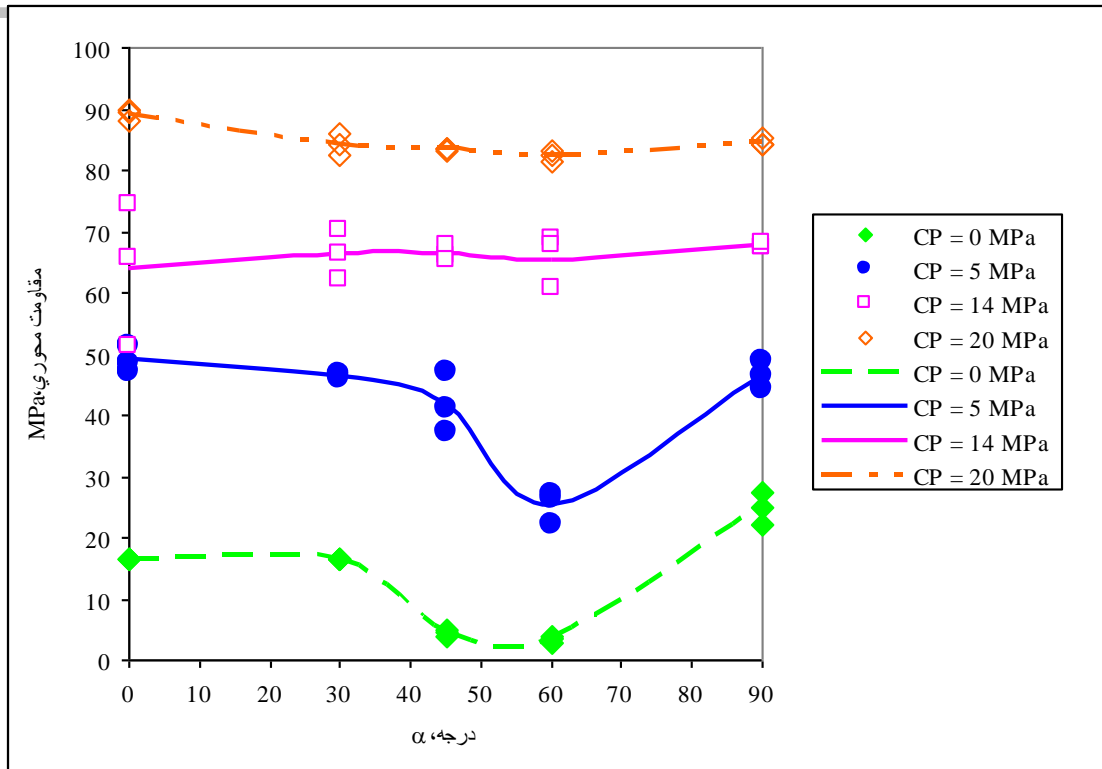
رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی های پر شده حاصل از تئوری جیگر با نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری برای سه نوع ماده پرکننده دارای مقاومت های مختلف به ترتیب در شکل های (۱۳، ۱۴ و ۱۵) با هم مقایسه شده اند. در کلیه حالات نتایج تجربی مقاومت محوری عموماً کمتر از مقدار آن در تئوری جیگر نشان می دهد. بخش وسیعی از ناپیوستگی به صورت پر شده هستند که تئوری جیگر بیانگر مقاومت آنها تحت تنش های سه محوری نمی باشد. این در صورتی است که در نرم افزارهایی همچون FLAC برای تعیین مقاومت ناپیوستگی ها تحت تنش سه محوری از رابطه جیگر استفاده می شود [۱۷]. وسعت ناحیه سهمی گون در رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی های پر شده در تئوری جیگر با افزایش فشار جانبی کاهش یافته و در فشار های جانبی بالا ناحیه سهمی گون ناپدید شده است. افزایش مقدار زاویه اصطکاک ناپیوستگی ها نیز باعث تشدید این موضوع می شود.



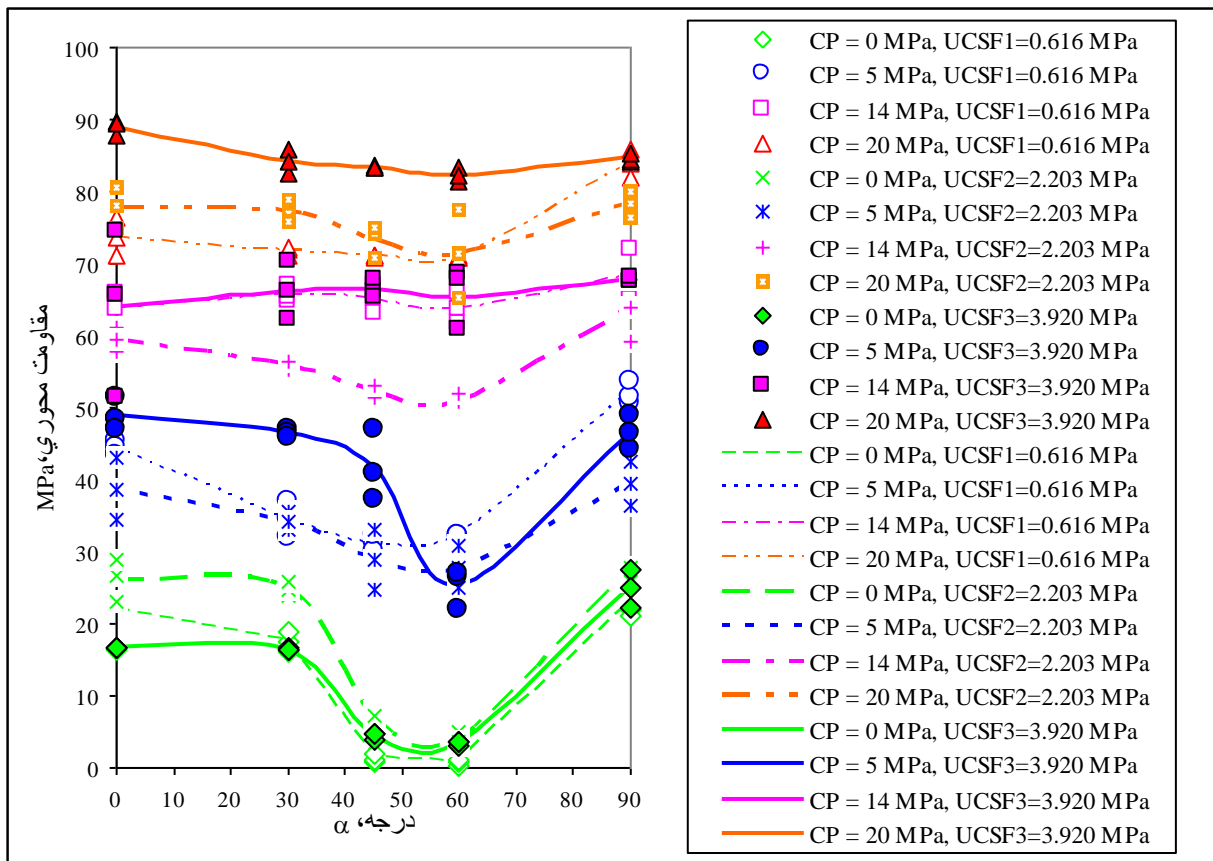
شکل ۹: رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی دارای ماده پر کننده با مقاومت یک محوری ۰/۶۱۶ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



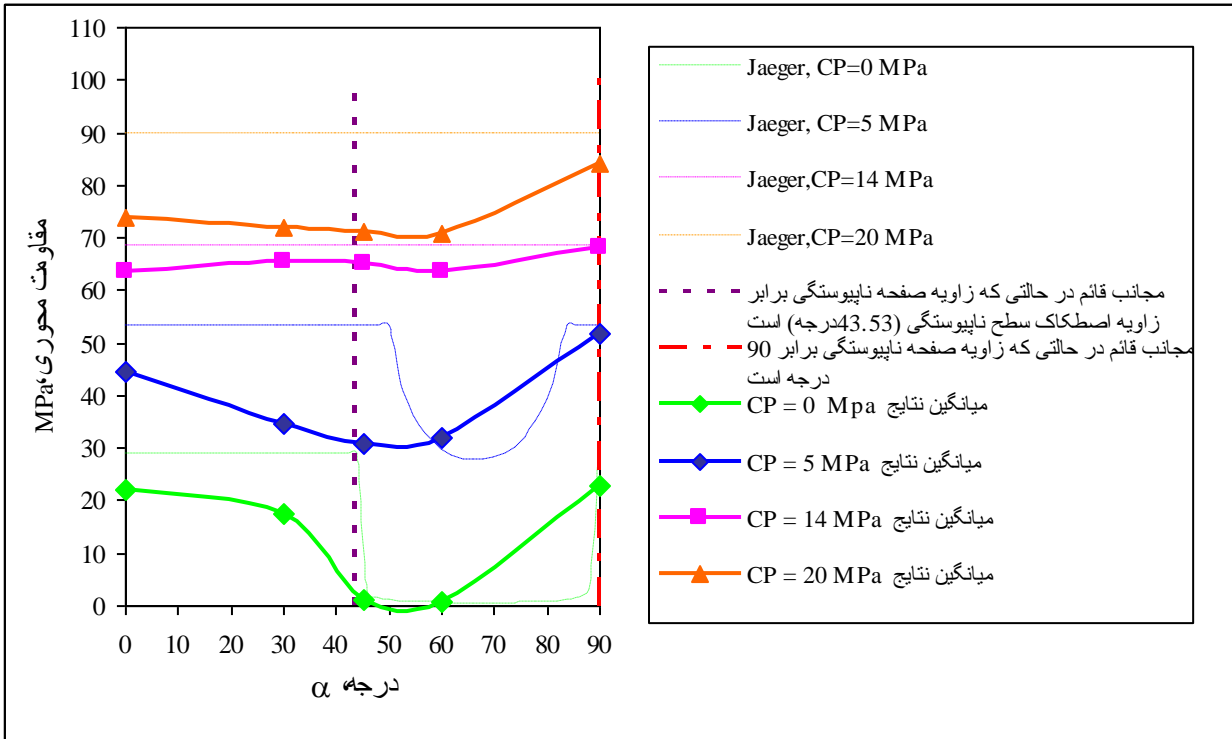
شکل ۱۰: رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی دارای ماده پر کننده با مقاومت یک محوری ۲/۲۰۲ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



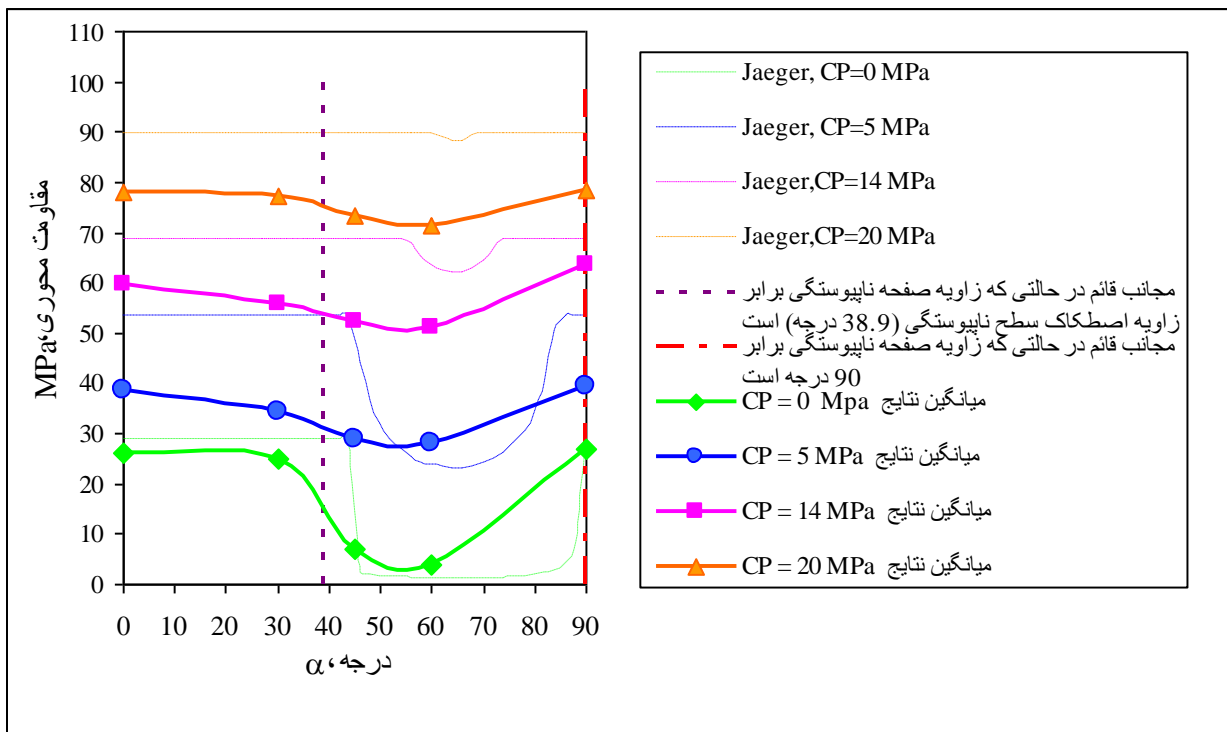
شکل ۱۱: رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی دارای ماده پرکننده با مقاومت یک محوری ۳/۹۲۰ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



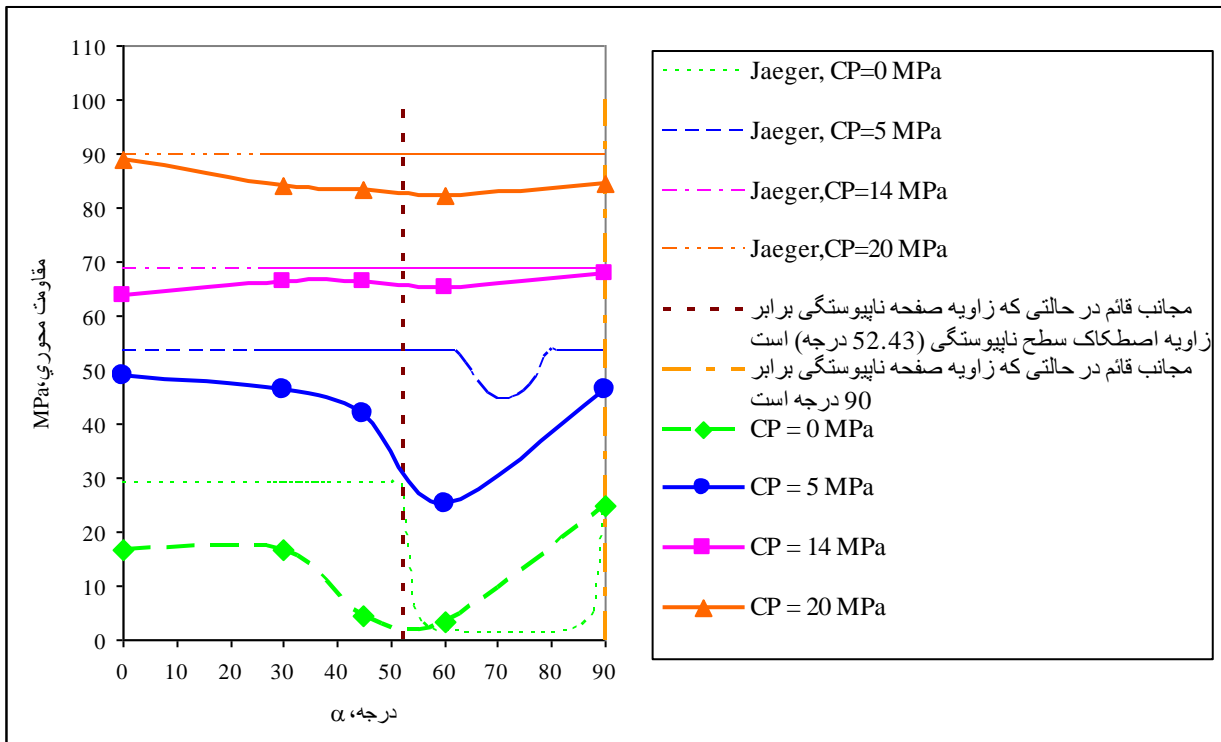
شکل ۱۲: مقایسه رابطه بین مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی پر شده از سه نوع مختلف مواد پرکننده دارای مقاومت فشاری یک محوری (UCS) مختلف تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف



شکل ۱۳: مقایسه رابطه بین متوسط مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی دارای ماده پرکننده با مقاومت یک محوری ۶۱۶/۰ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف نتایج اندازه گیری شده و تئوری جیگر



شکل ۱۴: مقایسه رابطه بین متوسط مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی دارای ماده پرکننده با مقاومت یک محوری ۲/۲۰۳ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف نتایج اندازه گیری شده و تئوری جیگر



شکل ۱۵: مقایسه رابطه بین متوسط مقاومت محوری و زاویه جهت یافتگی برای ناپیوستگی دارای ماده پرکننده با مقاومت یک محوری ۳/۹۲۰ مگاپاسکال تحت فشارهای جانبی (CP) مختلف نتایج اندازه گیری شده و تئوری جیگر

۵- نتیجه گیری

ناپیوستگی‌ها برای زوایای بین ۳۰ تا ۹۰ درجه با افزایش فشار جانبی ناچیز می‌گردد.

۴- با افزایش فشار جانبی، مقاومت محوری (σ_1) نمونه‌هایی که ماده پرکننده دهانه ناپیوستگی‌های آنها دارای مقاومت یک محوری، زاویه اصطکاک و درصد ماسه بیشتری است، بیشتر است. بنابر این نوع ترکیب ماده پرکننده و ویژگی‌های مکانیکی آن همچون مقاومت یک محوری و زاویه اصطکاک در تنش‌های بالاتر مؤثرتر است.

۵- در کلیه حالات نتایج تجربی مقاومت محوری عموماً کمتر از مقدار آن در تئوری جیگر نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Jaeger, J. C., 1960, *Shear failure of anisotropic rock*, Geol. Mag. Vol. 1, pp. 65 – 72.
- [2] Amit K.V. and Singh, T.N., 2010, *Modeling of a jointed rock mass under triaxial conditions*, Arab J Geosci., 3, pp. 91 - 103.
- [3] Brown E.T. and Trollope D.H., 1970, *Strength*

۱- در نمونه‌هایی که جهت یافتگی ناپیوستگی‌های آنها دارای زاویه ۰ و ۹۰ درجه، شکست در قطعات سنگ سالم اتفاق افتاد اما ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر خرد شدگی بیشتر پیدا کرد.

۲- برای جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها دارای زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه، شکست در صفحه ناپیوستگی‌ها اتفاق افتاد. در حالتی که ماده پرکننده دارای مقاومت بیشتر بود، شکست در محل صفحه تماس دیواره ناپیوستگی با ماده پرکننده اتفاق افتاد. اما برای ماده پرکننده دارای مقاومت کمتر شکست در ماده پرکننده حاصل شد.

۳- مقاومت محوری (σ_1) در زاویه جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها برابر ۰ و ۹۰ درجه کمتر از مقدار آن در سنگ سالم است. این نشان می‌دهد که وجود ناپیوستگی‌ها در هر شرایطی حتی در جهت عمود بر تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل نیز باعث کاهش مقاومت می‌شود.

۴- کاهش مقاومت محوری به عنوان تابعی از جهت یافتگی

- [11] Johnston, I.W. and Choi, S.K., 1986, *A synthetic soft rock for laboratory model studies*, Geotechnique. Vol. 36, No.2, pp. 251-263.
- [12] ASTM, 1997, *Standard test method for uniaxial compressive strength of intact core specimens*, ASTM Annual Book of Standards, D2938 – 95, pp. 279 - 281.
- [13] ISRM, 1981, *Suggested methods for determination of direct shear strength. Rock, Characterization Testing and Monitoring*, ed. by Brown, ET., pp. 135 – 137.
- [14] Gholmohammadie, S. 2010, *An investigation into the effect of strength and thickness of infill material on the shear failure criterion of discontinuities*, MSc. Thesis, Urmia University.
- [15] ASTM, 1997, *Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements*, ASTM Annual Book of Standards, D2664 – 95a, pp. 242 - 245.
- [16] ISRM, 1983. *Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 20, pp. 283 - 290.
- [17] FLAC, 1997, *Fast Lagrangian Analysis of Continua Manual*, Itasca Consulting Group, Minneapolis.
- [4] Einstein H.H. and Hirschfeld R.C., 1973, *Model studies in mechanics of jointed rocks*, J ASCE 99, pp. 229 - 248.
- [5] Karaku, H., Ulusay, R. and Isik, N.S., 2010, *Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 47, 657–665.
- [6] Vutukuri V.S. and Moomivand H., 1996, *Development of a brittle rock-like material having different values of porosity, density and strength*, EUROCK '96, Proc. ISRM International Symposium on Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, Torino, Italy, pp. 213 - 220.
- [7] Saucier K. L., 1967, *Development of material for modelling rock*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (Vicksburg Mississippi). Miscellaneous Paper, No. 6-93.
- [8] Stimpson B., 1970, *Modelling materials for engineering rock mechanics*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.7, pp. 71-121.
- [9] Hobbs, D. W., 1966, *Scale model studies of strata movement around mine roadways*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 3, pp. 101-127.
- [10] Indraratna, B., 1990, *Development and application of synthetic material to simulate soft sedimentary rocks*, Geotechnique, Vol. 40, No.2, pp. 189-200.