



## Research Article

### The effect of humidity on ductile behavior of wet plaster, in physical modelling, the case study of strike-slip faults system

Elahe Mehdikhanloo<sup>1</sup>, Ali Yassaghi<sup>\*1</sup> , Mohamad Reza Nikudel<sup>1</sup>

1-Department of Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 01 Jun 2023 Accepted: 11 Dec 2023

## Extended Abstract

### Introduction

The purpose of physical modeling in structural geology is to reconstruct the formation, development and evolution of structures on a laboratory scale with materials similar to crustal rocks. The physical-mechanical properties of the materials used in these modeling are of particular importance; So that the characteristics of these materials should be similar to the physical and mechanical characteristics of crustal rocks, and there should be a proportionality between the model and nature in terms of rheology, viscosity, and frictional resistance. Sand, mud-clay, gypsum and silicon are among the materials used in physical modeling. Gypsum powder, plaster, or hemi-hydrate in dry and wet form (killed gypsum) has also been used in modeling. In this study, the effect of humidity on viscous behavior of wet plaster in physical modelling of strike-slip fault system has been investigated. In these modellings wet plaster with 320%, 285% and 175% of humidity as a viscous material has been used. In determination of physical and mechanical (Atterberg limits) properties of wet plaster, the liquid limit of 178% and plastic limit of 96% was obtained. This study also provides data on behavior of wet plaster with changes in its humidity.

### Materials and Methods

Atterberg measurements were first used to measure the water content of wet (or dead) plaster. Based on this criterion, three limits are defined for the amount of wetness in the material, which includes the shrinkage limit, the plastic limit, and the liquid limit. In this study, due to the non-use of wet plaster in the humidity range of the shrinkage limit in physical modeling, the shrinkage limit test was not performed. In the plastic limit test, the minimum moisture required to turn the soil into mud is measured. In this regard, some balls of mud prepared from wet plaster are placed on a glass and by rotating the hand on the plaster, a rod with a diameter of 3mm is prepared. If cracks on the mud is developed, its humidity is at the level of mud. To determine the liquid limit of wet plaster, the penetrator cone device was used. Then the physical modeling of strike-slip faulting has been done using wet plaster with different wetness percentages. Three tests of physical modeling of strike-slip fault system in the basement and investigation of the effect of these movements on the sedimentary cover have been carried out using wet plaster with different humidity levels of 320%, 285% and 175%.

**Citation:** Mehdikhanloo, E., Yassaghi, A. and Nikudel, M.R., 2024. The effect of humidity on ductile behavior of wet plaster, *Res. Earth. Sci.* 15(2), (96-111) DOI: 10.48308/esrj.2024.104491

\* Corresponding author E-mail address: [yassaghi@modares.ac.ir](mailto:yassaghi@modares.ac.ir)





### Results and Discussion

The results of Physical modelling on strike-slip fault system shows that by decrease in humidity of wet plaster from 320% to 175%, the Riedel shear fractures distance is increased from 0.3cm to 1.9 cm and their lengths have increased from 2.5cm to 4.5cm. These results obtained from the distribution and frequency of shear fractures in the form of a decrease in the number of fractures, an increase in the distance and length of fractures, and the uneven development of fractures qualitatively indicate a decrease in the elastic limit of wet plaster because of the decrease on its humidity. Reduction on the humidity of the wet plaster resulted in development fault related folding in the modeling. The variations on the numbers, distance, type and lengths of shear fractures in wet plaster with different percent of humidity demonstrates that wet plaster acts as viscous behavior when its humidity is between plastic limit (96%) and liquid limit (178%). These experiments also confirm the results of previous studies on the brittle behavior of plaster at lower wettnes levels.

### Conclusion

The results obtained from this study in the investigation of Riddle shear fractures and folds related to the fault in the physical modeling of the strike-slip fault system showed that the water content in wet plaster to the extent of the plastic limit causes its plasticity behavior. The increase of water content more than this amount due to the relative decrease of adhesion and viscosity is associated with the decrease in the plasticity behavior of wet plaster. These changes are associated with the increase in the number of Riddle shear fractures and the decrease in the development of folds related to the thrust fault has been accompanied in the experiments. This conclusion is in agreement with the former studies that documented the brittle behavior of plaster with lower humidity than the humidity of the plastic limit.

**Keywords:** Mechanical properties, Ductility, Wet plaster, Strike-slip fault, Physical modelling.



## تأثیر رطوبت بر رفتار شکل پذیر گچ مرطوب در مدل سازی های فیزیکی، مطالعه موردی سامانه گسل های راستالغز

الهه مهدیخانلو<sup>۱</sup>، علی یساقی<sup>۱\*</sup> , محمدرضا نیکودل<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

### چکیده گسترده

#### مقدمه

هدف از مدل سازی های فیزیکی در زمین شناسی ساختاری بازسازی نحوه شکل گیری، توسعه و تکامل ساختارها در مقیاس آزمایشگاهی و با موادی شبیه به سنگ های پوسته است. خصوصیات فیزیکی - مکانیکی مواد مورد استفاده در این مدل سازی ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است؛ به طوری که ویژگی های این مواد باید مشابه ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ های پوسته بوده و بین مدل و طبیعت از لحاظ رئولوژیکی، ویسکوز و مقاومت اصطکاکی تناسب وجود داشته باشد. ماسه، گل رس، گچ و سیلیکون از جمله مواد مورد استفاده در مدل سازی های فیزیکی هستند. پودر گچ ساختمانی یا پلاستر یا همی هیدرات نیز به صورت خشک و مرطوب (گچ کشته) در مدل سازی ها استفاده شده است. در این مطالعه تأثیر رطوبت بر شکل پذیری گچ مرطوب از طریق مدل سازی فیزیکی ساختارهای سامانه گسل های راستالغز بررسی شده است. این مطالعه همچنین درک مناسبی از ویژگی های مکانیکی و رفتار گچ مرطوب با تغییرات درصد رطوبت فراهم می نماید. برای این منظور از گچ مرطوب به صورت کشته با رطوبت های ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ در این مدل سازی ها استفاده شده است.

#### مواد و روش ها

در این مطالعه ابتدا حدود آتربرگ برای سنجش میزان رطوبت گچ مرطوب (یا کشته) انجام شده. براساس این معیار سه حد برای مقدار رطوبت موجود در خاک تعریف می شود که شامل حد انقباض، حد خمیری و حد روانی است. در این مطالعه به دلیل عدم استفاده از گچ مرطوب در محدوده رطوبت حد انقباض در مدل سازی فیزیکی، آزمایش تعیین حد انقباض انجام نشده است. در آزمایش سنجش حد خمیری، حداقل رطوبت لازم برای تبدیل خاک به خمیر اندازه گیری می شود. در این راستا چند گلوله خمیری تهیه شده از گچ مرطوب روی شیشه ای قرار گرفته و با چرخش دست روی گچ، میله ای به قطر ۳mm تهیه می شود. اگر ترک هایی بر روی خمیر ایجاد شد، رطوبت آن در حد خمیری است. برای تعیین حد روانی گچ مرطوب از دستگاه مخروط نفوذسنج استفاده شده است. آنگاه مدل سازی فیزیکی گسل خوردگی راستالغز با استفاده از گچ مرطوب با درصدهای متفاوت رطوبت صورت پذیرفته است. سه آزمایش مدل سازی فیزیکی سامانه گسل راستالغز در پی سنگ و بررسی اثر این حرکات بر پوشش رسوبی با استفاده از گچ کشته و با رطوبت های متفاوت ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ انجام شده است.

استناد: مهدیخانلو، ا. و همکاران، ۱۴۰۳. تأثیر رطوبت بر رفتار شکل پذیر گچ مرطوب در مدل سازی های فیزیکی،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۵(۲)، (۹۶-۱۱۱)، DOI: 10.48308/esrj.2024.104491

## نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل‌سازی سامانه گسلش راستالغز چپ بر در پی سنگ و اثر آن بر روی پوشش رسوبی با استفاده از گچ مرطوب نشان داد که غالب ساختارهای توسعه یافته در این آزمایش بر روی محل جابجایی دو صفحه متحرک قاعده‌ای (گسل پی‌سنگی) می‌باشند و نواحی دور از این محل متحمل دگرشکلی نشده است. با کاهش رطوبت از ۳۲۰٪ به ۱۷۵٪ فاصله شکستگی‌های برشی ریدل همسوز از ۰/۳ cm به ۱/۹ cm و طول آن‌ها از ۲/۵ cm به حدود ۴/۵ cm افزایش یافته و همچنین شکستگی‌های برشی ریدل ناهمسوز (آنتی ریدل) با تأخیر و با تحمل دگرشکلی بیشتر تشکیل شده است. این نتایج به دست آمده از توزیع و فراوانی شکستگی‌های برشی به صورت کاهش تعداد شکستگی‌ها، افزایش فاصله و طول شکستگی‌ها و توسعه غیریکنواخت شکستگی‌ها در نتیجه کاهش رطوبت، به‌طور کیفی دلالت بر کاهش حد الاستیک گچ مرطوب در نتیجه کاهش رطوبت آن دارد. با کاهش رطوبت گچ کشته، علاوه بر ساختارهای معمول سامانه راستالغز، ساختار چین‌خوردگی و راندگی همراه نیز توسعه یافته است. تغییرات ساختاری مذکور در گچ مرطوب با درصد‌های متفاوت رطوبت، شواهدی از شکل‌پذیر بودن این ماده را در محدوده رطوبت بین حد خمیری (۹۶٪) تا حد روانی (۱۷۸٪) نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها همچنین نتایج مطالعات قبلی مبنی بر رفتار شکنای گچ در رطوبت‌های کمتر را تأیید می‌نماید.

## نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این مطالعه در بررسی شکستگی‌های برشی ریدل و چین‌خوردگی‌های مرتبط با گسل در مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسلش راستالغز نشان داد که وجود رطوبت در گچ مرطوب به میزان حد روانی موجب بروز رفتار شکل‌پذیری آن می‌شود. افزایش رطوبت بیش از این مقدار به دلیل کاهش نسبی چسبندگی و ویسکوزیته و افزایش فاصله مولکول‌ها با کاهش رفتار شکل‌پذیری گچ مرطوب همراه بوده که این تغییرات با افزایش تعداد شکستگی‌های برشی ریدل و کاهش توسعه چین‌خوردگی‌های مرتبط با گسلش راندگی در آزمایش‌ها همراه بوده است. این نتایج همچنین نشان داد که گچ مرطوب با رطوبت‌های زیر حد خمیری (کمتر از ۹۶٪) رفتاری مشابه مواد شکنای شناخته شده مانند گچ خشک و ماسه است و بنابراین به عنوان ماده شکل‌پذیر برای استفاده در مدل‌سازی‌های فیزیکی مناسب نمی‌باشد. در حالی که گچ مرطوب در رطوبت‌های بین ۹۶٪ تا ۱۷۸٪ (حد خمیری تا حد روانی) رفتار شکل‌پذیر داشته و می‌تواند به عنوان ماده شکل‌پذیر در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** خصوصیات مکانیکی، شکل‌پذیری، گچ مرطوب، گسل راستالغز، مدل‌سازی فیزیکی.

## مقدمه

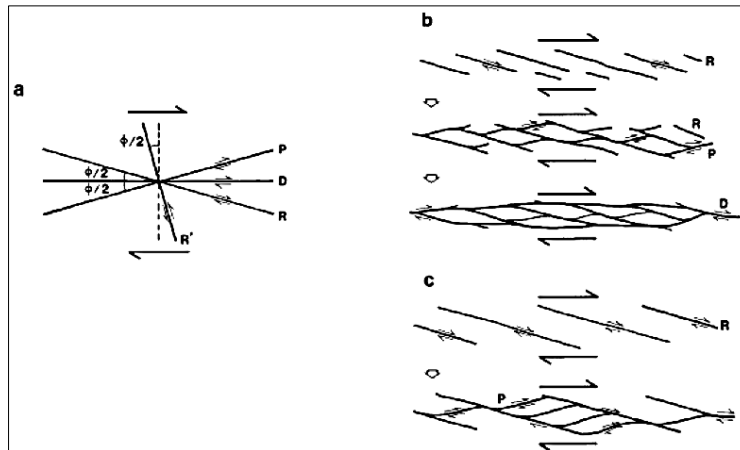
هدف از مدل‌سازی‌های فیزیکی بازسازی نحوه شکل‌گیری، توسعه و تکامل ساختارها در مقیاس آزمایشگاهی و با موادی شبیه به سنگ‌های پوسته است (Sokoutis et al, 2007). گرچه در طبیعت محصول نهایی دگرشکلی مشاهده می‌شود؛ اما به واسطه مدل‌سازی‌های فیزیکی می‌توان فرایند و نحوه تکامل و تقدم زمانی دگرشکلی سنگ‌ها را نیز شبیه

سازی کرد (Gibbs, 1983). خصوصیات فیزیکی - مکانیکی مواد مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌طوری‌که ویژگی‌های این مواد باید مشابه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های پوسته بوده (Van Gent, 2005) و بین مدل و طبیعت از لحاظ رئولوژیکی، ویسکوز و مقاومت اصطکاکی تناسب وجود داشته باشد (Weijermars and Schmeling, 1986). ماسه،

آبگیری به ژئوپس تبدیل شده‌اند. این عمل در لایه‌های رسوبی ممکن است بر اثر عملکرد آب‌های فرورو در شرایط فشار کم صورت گیرد و با افزایش حجم سنگ تا ۳۰٪ باعث بهم‌ریختگی لایه‌ها و چین‌خوردگی در لایه‌های بالایی پوشاننده آن شود. همچنین به علت پلاستیسیته (Plasticity) زیاد گچ به شکل توده یا عدسی در می‌آید و اکثر کانسارهای عظیم ژئوپس دنیا را تشکیل می‌دهد (Risnes and Korsnes, 1999; Okubo and Fukui, 1997). مطالعات مندل و همکاران (Mandal et al, 1994) برای به دست آوردن رابطه بین ضخامت پلاستر و فاصله شکستگی‌ها در دو آزمایش با میزان کشش و ضخامت متفاوت از پلاستر مرطوب (ملات گچ کشته) نشان داد که در پلاستر با ضخامت کمتر، شکستگی‌ها فواصل کمتری دارند و در ضخامت‌های بیشتر فاصله شکستگی‌ها بیشتر است. البته همواره با افزایش ضخامت فواصل شکستگی‌ها به‌طور خطی افزایش نمی‌یابد؛ بلکه رابطه غیرخطی بین افزایش ضخامت و افزایش فاصله شکستگی‌ها وجود دارد. نتیجه آزمایش دیگر آنها که تغییر در میزان کشش (مقاومت کششی) در مدل‌ها بود نشان داد که فواصل شکستگی‌ها در لایه‌ای از پلاستر با مقاومت کششی بالاتر خیلی بیشتر از لایه‌ای از پلاستر با مقاومت کششی کمتر است. رطوبت و نرخ استرین نقش اساسی در نوع رفتار پلاستر مرطوب دارند و هرچه نرخ استرین افزایش یابد فواصل شکستگی‌ها کاهش می‌یابد (Mandal et al, 1994). طبق نتایج کراتینوا و همکاران (Kratinová et al, 2006) ترکیب گچ با آب ماده مناسبی برای شبیه‌سازی ساختارهایی مانند انواع دیابیرها، پهنه‌های برشی و گسلی و همچنین چین‌خوردگی است که طی فرایند دگرشکلی شکل‌پذیر به وجود می‌آیند. بررسی قابلیت شکل‌پذیری گچ مرطوب در این مطالعه، مدل‌سازی شرایط اعماق همراه با افزایش دما و فشار که در نتیجه آن سنگ‌ها جریان می‌یابند (Van der Pluijm and Marshak, 2004) نمی‌باشد؛ بلکه ملاک بررسی رفتار (رئولوژی) شکل‌پذیر گچ مرطوب در دما و فشار معمول آزمایشگاهی و به جهت شبیه‌سازی سنگ‌های با رفتار شکل‌پذیر مانند سنگ‌های تبخیری در بخش شکنای پوسته است (Rutter, 1986). تاکنون مدل‌سازی‌های ساختاری بی‌شماری در قالب مدل سازی سامانه گسل‌های راستالغز با اهداف خاص و مواد مختلفی انجام شده است (An, 1998; Dauteuil and

گل‌رس، گچ و سیلیکون از جمله مواد مورد استفاده در مدل‌سازی‌های فیزیکی هستند (Sokoutis et al, 2007). پودر گچ ساختمانی یا پلاستر یا همی‌هیدرات با فرمول شیمیایی  $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$  نیز به صورت خشک و مرطوب (گچ کشته) در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است (Mansfield and Cartwright, 2001; Van Gent, 2005; Kratinová et al, 2006; Sæterdal Bøyum, 2015). صنعت ترکیبات مختلف سولفات کلسیم جزء مواد معدنی غیرفلزی با خاصیت چسبندگی و شکل‌پذیری است. پودر پلاستر از فراوری ژئوپس طبیعی با فرمول شیمیایی  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  به دست می‌آید و برای مدل سازی سنگ‌های بخش شکنای پوسته بالایی مناسب است. این ماده به خوبی معیار شکست کولمب را نسبت به تشکیل انواع شکستگی‌ها در رژیم‌های کششی، فشارشی و راستالغز نشان می‌دهد (Van Gent, 2005). از ویژگی‌های مطلوب پلاستر، قابل دسترس و ارزان بودن، مضر و سمی نبودن به لحاظ شیمیایی و اندازه ریز دانه‌های آن بوده که این ویژگی برای نشان دادن ساختارهای با اندازه کوچک مناسب است (Kratinová et al, 2006). از دیگر مزیت‌های گچ صنعتی نداشتن قابلیت انقباض مانند آنچه که گل‌رس دارد است و ترک‌های حاصل از خشک‌شدن و غیرمرتبط با ساختارها در آن به وجود نمی‌آید (Supak et al, 2006). به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پودر گچ صنعتی یا پلاستر (پودر خشک گچ) مانند چسبندگی ظاهری، ضریب اصطکاک داخلی و زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی و چگالی حجمی این ماده مناسب مدل‌سازی فیزیکی سنگ‌های پوسته و انواع گسل‌های موجود در آن است (Abe et al, 2011). طبق نظر کراتینوا و همکاران (Kratinová et al, 2006) رفتار شکل‌پذیر پلاستر در مدل سازی‌های فیزیکی به مقدار رطوبت و جذب آب آن بستگی دارد. افزودن آب به پلاستر هم در مقیاس میکروسکوپی و هم در مقیاس ماکروسکوپی بر ویژگی‌های آن تأثیرگذار است و موجب افزایش فاصله بلورها نسبت بهم و کاهش پیوند بین آنها می‌شود (Pachon Rodriguez et al, 2014). از آنجایی که سنگ منشأ پودر ساختمانی پلاستر، کانسارهای ژئوپس هستند جذب رطوبت در واحدهای سنگی بر مورفولوژی منطقه نیز تأثیرگذار است. اغلب کانسارهای بزرگ ژئوپس در اصل انیدریت بوده‌اند که بعد از عمل

های برشی ریدل نشان‌دهنده جهت حرکت بلوک‌هاست و به‌طور وسیع در تفسیر تکامل و فرگشت جنبشی گسل‌های راستالغز به کار برده می‌شود (Fossen, 2010; Davis et al, 2012).



شکل ۱: شکستگی‌های برشی ریدل همسو R و P و ناهمسو R' در سامانه گسل امتدادلغز راست‌بر ایده‌آل. اقتباس از (Woodcock and Fischer, 1986).

دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. برای تهیه گچ کشته از پودر گچ خشک صنعتی یا پلاستر استفاده شده است؛ بدین منظور مقداری گچ الک شده با آب ترکیب می‌شود. گچ و آب تا رسیدن به مرحله‌ای که گچ از گیرش خارج شود و به گچ کشته یا به اصطلاح "ملات گچ" تبدیل شود، بهم افزوده می‌شوند. از گچ کشته یا مرطوب آماده شده برای آزمایش حدود آتربرگ و مدل‌سازی‌ها استفاده شده است. حدود آتربرگ یک معیار تعریف شده برای سنجش میزان رطوبت خاک است. براساس این معیار سه حد برای مقدار رطوبت موجود در خاک تعریف می‌شود که شامل حد انقباض، حد خمیری و حد روانی است. در این مطالعه به دلیل عدم استفاده از گچ مرطوب در محدوده رطوبت حد انقباض در مدل‌سازی فیزیکی، آزمایش تعیین حد انقباض انجام نشده است. قبل از تهیه گچ کشته مقدار رطوبت اولیه پودر گچ خشک اندازه‌گیری شده که مقدار آن حدود ۷٪ و معادل رطوبت محیط است که به دلیل خاصیت جاذب رطوبت بودن پودر گچ جذب آن شده است. پس از توزین پودر گچ و قرار دادن در گرمخانه مقدار رطوبت اولیه اندازه‌گیری می‌شود. درصد رطوبت در پودر گچ قبل از ترکیب با آب و در حالت روانی و خمیری از فرمول رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

(Mart, 1998; Casas et al, 2001). گسل‌های راستالغز یکی از ساختارهای رایج در پوسته هستند که به نسبت کم‌پهنا و با شیب تقریباً قائم می‌باشند. شکستگی‌های برشی توسعه یافته در سامانه گسل‌های راستالغز شامل انواع ریدل همسو و ناهمسو می‌باشد (شکل ۱). وضعیت هندسی شکستگی

در این مطالعه تأثیر رطوبت (در مقادیر متفاوت) بر رفتار شکل‌پذیر گچ صنعتی یا پلاستر از طریق مطالعه توسعه شکستگی‌های برشی ریدل همسو و ناهمسو در مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسل‌های راستالغز بررسی شده است. این مطالعه همچنین درک مناسبی از ویژگی‌های مکانیکی و رفتار گچ مرطوب با تغییرات درصد رطوبت فراهم می‌نماید. بدین منظور ابتدا آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی گچ مرطوب (حدود آتربرگ) انجام شده، آنگاه نتایج مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسل راستالغز با استفاده از گچ مرطوب و با درصدهای متفاوت از رطوبت ارائه شده است.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه ابتدا آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی شامل تعیین حدود آتربرگ گچ مرطوب (یا کشته) انجام شده و سپس مدل‌سازی فیزیکی گسل خوردگی راستالغز با استفاده از گچ مرطوب با درصدهای متفاوت رطوبت صورت پذیرفته که نتایج آن‌ها در بخش نتایج ارائه شده است.

### آزمایش‌های فیزیکی - مکانیکی

آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی گچ مرطوب (یا کشته) در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی

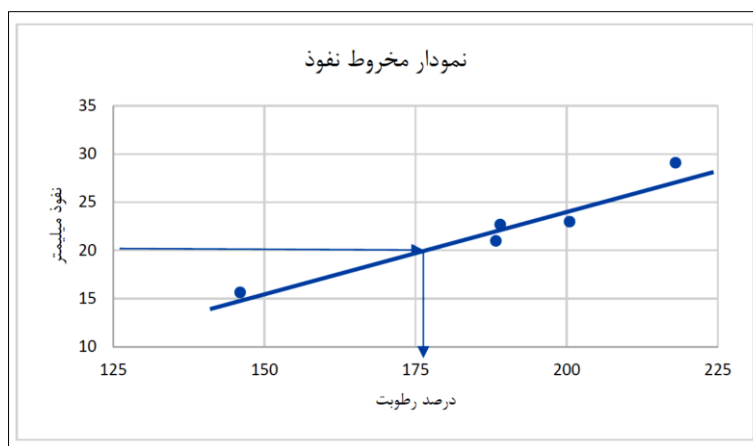
رابطه (۱)

$$\omega = \frac{\text{وزن نمونه خشک} - \text{وزن نمونه مرطوب}}{\text{وزن نمونه خشک}} \times 100$$

برای تعیین حد روانی گچ مرطوب از دستگاه مخروط نفوذسنج استفاده شده است (توکلی، ۱۳۹۰). مقادیر به دست آمده از آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱: مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایش حد روانی برای گچ مرطوب.

شماره	میزان نفوذ (mm)	وزن ظرف + گچ مرطوب (g)	وزن ظرف (g)	وزن خشک نمونه (g)	رطوبت (%)
۱	۲۹/۱	۴۸/۹۷	۳۱/۴۵	۳۶/۹۶	۲۱۷/۹۷
۲	۲۳	۷۰/۱۴	۴۲/۱۱	۵۱/۴۴	۲۰۰/۴۲
۳	۲۲/۷	۴۹/۸۸	۲۸/۰۹	۳۵/۶۳	۱۸۹
۴	۲۱	۷۰/۶۹	۴۴/۴۵	۵۳/۵۵	۱۸۸/۳۵
۵	۱۵/۶۵	۶۶/۱۰	۴۱/۶۲	۵۱/۵۷	۱۴۶/۰۳



شکل ۲: نمودار به دست آمده از آزمایش حد روانی گچ مرطوب با استفاده از مخروط نفوذسنج. در نمودار شکل ۲ میزان نفوذ یا تعداد ضربه در مقابل درصد رطوبت ارائه شده که براساس آن به ازای ۲۰ mm مقدار استاندارد نفوذ، رطوبت حد روانی گچ ۱۷۸٪ است.

سنجش رطوبت قرار می‌گیرد و پس از توزین، به مدت ۱۲-۱۸ ساعت در گرمخانه قرار داده می‌شود. پس از خارج کردن ظرف از گرمخانه، درصد رطوبت حد خمیری ( $W_p$ ) محاسبه می‌شود. رطوبت مواد در حد خمیری از حد روانی پایین‌تر است. طبق نتایج جدول ۲ مقدار رطوبت حد خمیری گچ مرطوب ۹۵/۶۵٪ به دست آمد.

در آزمایش سنجش حد خمیری، حداقل رطوبت لازم برای تبدیل خاک به خمیر اندازه‌گیری می‌شود. در این راستا چند گلوله خمیری تهیه شده از گچ مرطوب روی شیشه‌ای قرار گرفته و با چرخش دست روی گچ، میله‌ای به قطر ۳mm تهیه می‌شود. اگر ترک‌هایی بر روی خمیر ایجاد شد، رطوبت آن در حد خمیری است. میله گچ خمیری در ظرف

جدول ۲: مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش حد خمیری گچ مرطوب

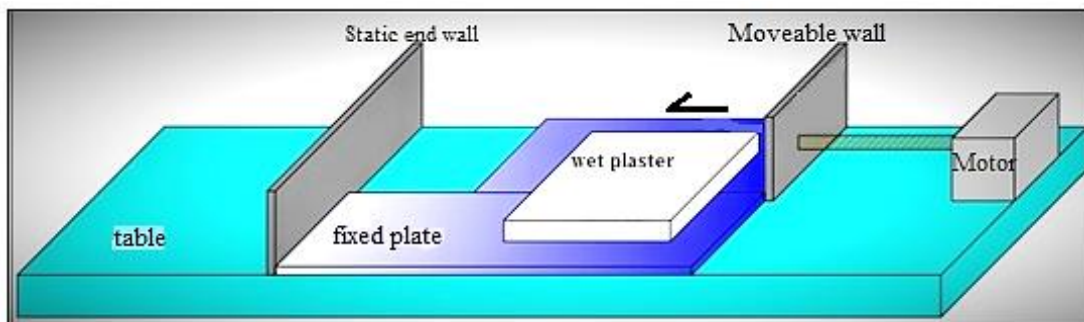
رطوبت حد خمیری (%)	وزن ظرف + وزن نمونه مرطوب (g)	وزن ظرف (g)	وزن خشک نمونه + وزن ظرف (g)
۹۵/۶۵	۳۹/۱۴	۳۷/۷۹	۳۸/۴۸

مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسلس راسنالغز در مدل‌سازی‌های فیزیکی انتخاب نوع مواد، طراحی نوع دستگاه مدل‌سازی، مقیاس مدل و انطباق و قابل قیاس بودن با شرایط طبیعی دارای اهمیت بسزایی است. مدل

سازي های صورت گرفته در این مطالعه در آزمایشگاه زمین ساخت تجربی دانشگاه تربیت مدرس و با استفاده از گچ "کشته" به عنوان ماده شکل‌پذیر انجام شده است. هر چند در این مدل‌سازی‌ها منطقه خاصی مورد نظر نبوده است

آزمایش‌ها با توجه به دمای حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد آزمایشگاه و زمان نسبتاً کوتاه آزمایش قابل ملاحظه نبوده گرچه امکان اندازه‌گیری آن نیز عملی نبوده است. دستگاه مورد استفاده شامل یک موتور، میله انتقال دهنده نیرو، دیواره ثابت در بخش انتهایی دستگاه و دیواره متحرک متصل به میله انتقال نیرو است. صفحات پلاستیکی به عنوان پی‌سنگ، بین دو دیواره تعبیه شده است که با روشن شدن موتور و حرکت دیواره متحرک، حرکت چپ بر گسل راستالغز بین صفحات شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۳). نرخ جابجایی صفحات در دستگاه مورد استفاده حدود ۲ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد. برای اندازه‌گیری و پایش شکستگی‌های برشی ریدل از ابزار ترسیم نشانگرهای واتنش و دوربین عکاسی استفاده شده و داده‌های بدست آمده از آنها در بخش نتایج ارائه شده است. درصد دگرشکلی از تغییر قطر نشانگرهای واتنش نسبت به قطر دایره اولیه محاسبه و مقدار جابجایی صفحه متحرک در مقابل صفحه ثابت با یکای سانتی‌متر بیان شده است.

اما به جهت شباهت گچ کشته مورد آزمایش با شرایط طبیعی برخی واحدهای سنگی، مانند سازند دشتک (با ضخامت حدود ۸۰۰ متر) و سازند گچساران (حدود ۱۶۰۰ متر) در زاگرس (Bahroudi et al, 2003)، که به عنوان سازندهای تبخیری با ویژگی شکل‌پذیر شناخته می‌شوند، میانگین ۱ سانتی‌متر ضخامت از گچ کشته در مدل معادل ۱۰۰۰ متر ضخامت در روی زمین انتخاب شده است. به جهت جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای بر تفسیر نتایج، پهنای مدل کمی وسیع‌تر انتخاب شده تا برش‌های تفسیری از بخش‌های مرکزی مدل کمترین اثرات حاشیه‌ای را داشته باشد. سه آزمایش مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسل راستالغز در پی‌سنگ و بررسی اثر این حرکات بر پوشش رسوبی با استفاده از گچ کشته و با رطوبت‌های متفاوت ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ انجام شده است. مقدار رطوبت گچ کشته قبل و پس از آزمایش اندازه‌گیری شده و بر این اساس کاهش رطوبت حداکثر ۱۰٪ برآورد شده است. بنابراین با توجه به درصد بالای رطوبت اولیه، کاهش رطوبت گچ کشته در طی



شکل ۳: نمایی از دستگاه دگرشکلی و مواد مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسل راستالغز با استفاده از گچ مرطوب.

جدول ۳: کمیت‌های مدل‌سازی سه‌گانه گسلش راستالغز.

نرخ حرکت (mm/min)	ضخامت نمونه (cm)	ابعاد سطحی گچ مرطوب (cm)	رطوبت (%)
۲	۱/۵	۲۴×۲۰	۳۲۰
۲	۱/۵	۲۲/۵×۱۶	۲۸۵
۲	۱/۵	۲۶×۲۱	۱۷۵

### شبیه‌سازی گسلش راستالغز با استفاده از گچ با ۳۲۰٪

#### رطوبت

نتایج بدست آمده از این آزمایش نشان داد که با شروع آزمایش و در طی ۱ سانتی‌متر جابجایی صفحه متحرک نسبت به صفحه ثابت (شکل ۳)، شکستگی‌های چپ بر و

### نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از سه آزمایش مدل‌سازی فیزیکی حرکت گسلش راستالغز چپ بر در پی‌سنگ و اثر آن بر روی گچ مرطوب، با درصد‌های متفاوت ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ رطوبت، به عنوان پوشش رسوبی ارائه شده است.



افزایش جابجایی به حدود ۲ سانتی‌متر، شکستگی‌های برشی ناهمسوی راستبر  $R'$  نیز توسعه یافته است (شکل ۴ ج و جدول ۴).

همسوی ریدل  $R$  به تعداد حداقل ۳ شکستگی در واحد طول ۳ cm و با طول تقریبی ۲/۵ cm و فاصله‌داری ۰/۵ cm از یکدیگر تشکیل شده است (شکل ۴ ب و جدول ۴).

جدول ۴: خلاصه نتایج مدل‌سازی فیزیکی گسلش راستالغز با ۳۲۰٪ رطوبت گچ مرطوب.

توضیحات	میانگین فاصله شکستگی‌های $R$ (cm)	میانگین طول شکستگی‌های $R$ (cm)	میانگین تعداد شکستگی $R$ در مقیاس ۳ cm	قطر بیضی کرنش از دایره اولیه ۳/۷ (cm)	دگرشکلی (%)	مقدار جابجایی (cm)
تشکیل شکستگی‌های چپ‌بر همسو ( $R$ )	۰/۵/-۰/۳	۲/۵	۳	۳/۹	۵/۴	۱
تشکیل شکستگی‌های راست‌بر غیر همسو ( $R'$ )	۰/۵	۲/۵	۹ شکستگی	۴/۲	۱۳/۵۱	۲
گسیختگی بیضوی‌های کرنش	-	-	-	-	-	۳

(شکل ۴ د). غالب ساختارهای توسعه یافته در این آزمایش بر روی محل جابجایی دو صفحه متحرک قاعده‌ای (گسل پی‌سنگی) می‌باشند و نواحی دور از این محل متحمل دگرشکلی نشده است. با گسیختگی نمونه و تشکیل شکستگی برشی  $Y$ ، توسعه شکستگی‌های برشی ریدل همسو و ناهمسو متوقف می‌شوند و جابجایی اعمالی فقط در راستای این شکستگی  $Y$  صورت می‌گیرد و بنابراین اندازه‌گیری‌ها و پایش شکستگی‌های توسعه یافته فقط تا قبل از این مرحله از توسعه شکستگی برشی  $Y$  صورت گرفته است.

پس از ۳ سانتی‌متر جابجایی صفحه متحرک، شکستگی‌های برشی توسعه یافته در مرحله قبل به‌طور بخشی بهم متصل شده و شکستگی برشی  $Y$  (موازی با راستای گسل بین دو صفحه قاعده‌ای متحرک) را توسعه داده‌اند. شکستگی‌های برشی همسو و ناهمسو ( $R$  و  $R'$ ) پلکانی بوده و در فضاهای همپوشان مابین آنها نمونه تحت فشار قرار گرفته و متحمل بالا آمدگی (Push up) گردیده است (شکل ۴ د). در انتهای این مرحله و با افزایش جابجایی به ۴ سانتی‌متر، ساختارهای Push-up توسعه یافته در محل همپوشانی شکستگی‌های برشی همسو به هندسه مشابه ساختار چین‌خوردگی مرتبط با گسلش رانده تحول یافته‌اند



شکل ۴: نتایج مدل‌سازی فیزیکی سامانه گسلش راستالغز چپ‌بر با ۳۲۰٪ رطوبت گچ مرطوب: الف: قبل از تغییر شکل و جابجایی. ب: ۱ جابجایی: تشکیل شکستگی‌های چپ‌بر همسوی ریدل ( $R$ ). ج: ۲ cm جابجایی: تشکیل و توسعه شکستگی‌های ناهمسوی  $R'$  و همسو  $R$ . د: ۴ cm جابجایی: تشکیل ساختار بالا آمده (Push up) در محل هم‌پوشانی شکستگی‌های پلکانی و تکامل آن به ساختار مشابه چین‌خوردگی همراه با گسل رانده.

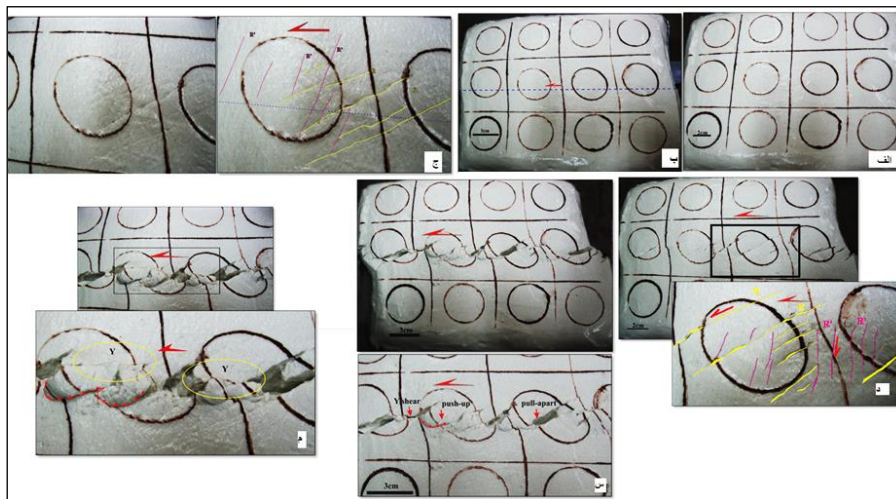
## شبیه سازی گسلش راستالغز با استفاده از گچ با ۲۸۵٪ رطوبت

در این آزمایش با شروع حرکت و جابجایی صفحه متحرک تا حدود ۱cm، دگرشکلی به صورت پلاستیک و بدون ظهور شکستگی در سطح است (شکل ۵ ب). پس از ۱/۵ cm جابجایی، شکستگی های R و R' به طور همزمان تشکیل شده اند. طول شکستگی های R بیش از ۲cm و تعداد آن ها حدود ۳ شکستگی در مقیاس طول ۳cm و فاصله داری آن ها از هم حدود ۰/۸cm است. در شکل ۵ ج برش های چپ بر R با رنگ زرد و برش های راست بر R' با رنگ بنفش نشان داده شده است. پس از ۲cm جابجایی، میانگین طول شکستگی های R با اتصال به یکدیگر به حدود ۴cm رسیده، فاصله داری آنها به حداکثر ۰/۸ cm و تعداد آن ها ۴

شکستگی در مقیاس طول ۳cm است. در این مرحله شکستگی های راست بر ناهمسوی R' نیز توسعه یافته است (شکل ۵ د و جدول ۵). پس از ۳cm جابجایی، پوشش رسوبی (گچ مرطوب) تقریباً گسیخته شده است. بعد از گسیختگی توسعه و رشد شکستگی ها متوقف می شود. در این مرحله تنوعی از ساختارهای Push up و Pull apart تشکیل شده و در برخی نقاط ساخت Push up به هندسه مشابه چین خوردگی مرتبط با گسلش رانده تبدیل شده است (شکل ۵ س). پس از ۴cm از حرکت صفحه متحرک، شکستگی های برشی به یکدیگر متصل شده و با توسعه شکستگی برشی Y همراه است که منجر به گسیختگی کامل لایه گچ (پوشش رسوبی) شده است (شکل ۵ م).

جدول ۵: نتایج شبیه سازی راستالغز با ۲۸۵٪ رطوبت گچ.

مقدار جابجایی (cm)	دگرشکلی (%)	قطر بیضی کرنش (cm)	تعداد شکستگی ها در واحد طول ۳cm	میانگین طول شکستگی ها (cm)	فاصله شکستگی ها (cm)	توضیحات
۰	۰	۳/۷	-	-	-	-
۱	۸/۱	۴	-	-	-	دگرشکلی پلاستیک بدون شکستگی
۱/۵	۱۰/۸۲	۴/۱	۳ شکستگی	R=۲	۰/۸	تشکیل شکستگی های چپ بر R و راست بر R'
۲	۱۶/۲۲	۴/۳	۴ شکستگی	R=۴	۰/۰-۰/۸	-
۳	-	گسیختگی پوشش	-	-	-	-



شکل ۵: الف: بدون جابجایی. ب: دگرشکلی پلاستیک پس از ۱cm جابجایی. ج: ۱/۵ cm جابجایی، تشکیل شکستگی های همسوی R و ناهمسوی R'. د: ۲cm جابجایی، توسعه و رشد شکستگی های R و R'. س: ۳cm جابجایی، تشکیل ساختارهای بالا آمده یا Push up و فروافتاده یا Pull apart. م: ۴cm جابجایی، گسیختگی پوشش با تشکیل برش Y (موازی گسل اصلی) به همراه راندگی ساختارهای بالا آمده.

آنها از  $0/3\text{cm}$  به  $1/9\text{cm}$  افزایش یافته است (جدول‌های ۴ تا ۶). اثر دیگر کاهش رطوبت، شروع تشکیل شکستگی‌های برشی ریدل در پوشش رسوبی (گچ مرطوب) در جابجایی بیشتر صفحه متحرک و تحمل بیشتر دگرشکلی می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که در مدل‌سازی با  $320\%$  از رطوبت گچ، شکستگی‌های برشی R پس از  $5/4\%$  دگرشکلی (شکل ۴ ب و نمودار شکل ۷ الف)، در مدل‌سازی با  $285\%$  رطوبت، پس از  $10/82\%$  دگرشکلی (شکل ۵ ج و نمودار شکل ۷ ب) و در مدل‌سازی با  $175\%$  رطوبت، این شکستگی‌ها پس از  $13/52\%$  دگرشکلی ایجاد می‌شوند (شکل ۶ ب و نمودار شکل ۷ ج). تأخیر در توسعه شکستگی‌ها در آزمایش گچ مرطوب را ستردال بیوم (Sæterdal Bøyum, 2015) طولانی‌تر شدن مرحله پلاستیک نمونه قبل از ورود به مرحله گسیختگی و توسعه شکستگی‌ها می‌داند. این مسئله می‌تواند نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر گچ مرطوب در رطوبت‌های نزدیک به حد روانی ( $175\%$  رطوبت) به صورت ماده‌ای شکل‌پذیر باشد. از نتایج آزمایش مدل‌سازی آنالوگ گسل‌های نرمال که توسط ویتسجک و همکاران (Withjack et al, 2007) با استفاده از گل‌رس و ماسه انجام شده تفاوت‌های مهم بین این دو ماده و تشکیل انواع چین‌های مرتبط با گسل‌های نرمال در گل‌رس و عدم وجود این چین‌ها در ماسه است. طبق نتایج آنها تشکیل چین در گل‌رس یکی از شواهد مهم در ارتباط با شکل‌پذیری گل‌رس در مقایسه با ماسه است (Withjack et al, 2007)؛ همچنین مدل‌سازی سامانه گسل‌های راستالغز چپ‌بر توسط داوتیل و مارت (Dauteuil and Mart, 1998) با استفاده از سه لایه ماسه، سیلیکون و عسل به ترتیب برای بازسازی پوسته شکننا، لایه خمیری و بخش نرم‌کره نیز نشان داد که تشکیل چین نمود واضحی از دگرشکلی شکل‌پذیر ایجاد شده توسط یک ماده شکل‌پذیر (در آزمایش ایشان سیلیکون) است. در مطالعه حاضر، ساختار غالب در گچ با  $320\%$  رطوبت، شکستگی‌های برشی ریدل می‌باشد (شکل ۴ ج). در گچ با  $285\%$  رطوبت، علاوه بر این شکستگی‌ها، تا حدی چین‌خوردگی مرتبط با گسلش رانده نیز ایجاد شده است (شکل ۵ م). اما با کاهش بیشتر رطوبت تا  $175\%$ ، ساختارهایی با هندسه نظیر چین‌خوردگی و همچنین تغییر در راستا و زاویه شکستگی‌ها به صورت شکستگی‌های منحنی شکل و ساختارهای بال‌آمده مرتبط با گسل‌خوردگی رانده می‌شود (شکل ۶

## شبه‌سازی سامانه راستالغز با استفاده از گچ با $175\%$ رطوبت

در این آزمایش تا جابجایی حدود  $2\text{cm}$  صفحه متحرک به سوی صفحه ثابت، دگرشکلی نمونه گچ مرطوب به صورت پلاستیک همراه با تبدیل دواير اولیه به بیضی و افزایش قطر آنها و بدون تشکیل شکستگی‌های برشی ریدل همراه است. پس از  $2\text{cm}$  جابجایی و حرکت بلوک متحرک، اولین شکستگی‌های چپ‌بر همسوی ریدل (R) در سطح نمونه ظاهر می‌گردد. در این مرحله تعداد شکستگی‌ها حدود ۳ عدد در مقیاس طولی  $3\text{cm}$  و فاصله‌داری  $0/8\text{cm}$  است و طول اولیه شکستگی‌ها بین ۱ تا  $2\text{cm}$  می‌باشد. این شکستگی‌های برشی توسعه محدود و پراکندگی نامنظمی دارند (شکل ۶ ب). در  $3\text{cm}$  جابجایی و حرکت بلوک متحرک، ۳ شکستگی ایجاد شده در مرحله قبل ناشی از اتصال آنها به یکدیگر به ۲ شکستگی کاهش می‌یابد. میانگین فاصله‌داری این شکستگی‌های برشی نسبت به هم حدود  $1/9\text{cm}$  و دارای طولی متغیر بین  $3/7$  تا  $4/8\text{cm}$  می‌باشند (شکل ۶ ج). با رسیدن جابجایی و حرکت بلوک متحرک به  $4\text{cm}$ ، شکستگی‌های برشی بیشتر به یکدیگر متصل شده و شکستگی برشی Y موازی راستای گسل اصلی را به وجود می‌آورند. در این مرحله برش‌های ناهمسوی راست‌بر  $R'$  در بخش محدودی از پوشش گچ مرطوب مورد آزمایش تشکیل می‌گردد. با ادامه دگرشکلی و افزایش جابجایی به  $5\text{cm}$ ، دگرریختی از شکل ساده شکستگی‌ها به ساختارهایی مشابه چین‌خوردگی و ساخت‌های مشابه مانند ساخت Pop-up تحول یافته است (شکل ۶ س). در انتهای مراحل دگرشکلی و پس از  $6\text{cm}$  جابجایی، بخش‌های انتهایی لایه گچ افزایش ضخامت یافته و در این بخش‌ها ساختار مشابه چین‌خوردگی مرتبط با گسلش رانده می‌شود (شکل ۶ م).

## بحث

مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی فیزیکی حرکت گسلش راستالغز در پی‌سنگ و توسعه شکستگی‌های برشی ریدل بر روی پوشش رسوبی متشکل از گچ مرطوب با درصد‌های متفاوت از رطوبت نشان داد که با کاهش رطوبت از  $320\%$  به  $175\%$ ، تعداد شکستگی‌ها کاهش (از ۹ عدد به ۲ شکستگی)، طول آنها از  $2/5\text{cm}$  به  $4/5\text{cm}$  و فاصله‌داری

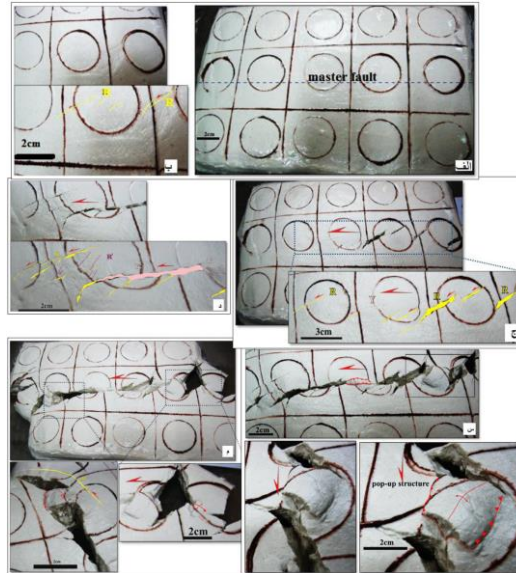
در گچ با ۱۷۵٪ رطوبت می‌تواند بیانگر کاهش شکل‌پذیری در نتیجه افزایش رطوبت از ۱۷۵٪ به ۳۲۰٪ باشد (مقایسه شکل‌های ۴ با ۶). همچنین شکستگی‌های برشی ناهمسو  $R'$  در گچ با ۳۲۰٪ و ۲۸۵٪ رطوبت، توسعه بیشتری نسبت به آزمایش با ۱۷۵٪ رطوبت نشان می‌دهد (مقایسه شکل‌های ۴ با ۶). طبق این نتایج افزایش رطوبت گچ مرطوب نه تنها موجب کاهش نسبی چسبندگی و ویسکوزیته آن می‌شود بلکه بر تعداد، فاصله، طول و نوع شکستگی‌ها نیز موثر است و می‌تواند نشان‌دهنده تغییر رئولوژی یا رفتار گچ مرطوب باشد. این نتایج با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی فیزیکی سیستم راستالغز انجام شده توسط آن (An, 1998) نیز مطابقت دارد، زیرا افزایش رطوبت موجب افزایش فاصله بلورها نسبت به هم و کاهش پیوند بین بلورها (Yu and Brouwers, 2011; Pachon-Rodriguez et al, 2014) تسهیل لغزش ذرات و در نتیجه توسعه شکستگی‌های برشی مزدوج ریدل می‌شود (An, 1998)؛ بنابراین رطوبت مناسب برای گچ مرطوب که رفتار شکل‌پذیری را نشان دهد رطوبتی بین حد خمیری (حدود ۱۰۰٪) تا حد روانی (حدود ۲۰۰٪) است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی گسل-ها در خم لیتوسفر در مناطق فرورانش توسط سوپاک و همکاران (Supak et al, 2006) و با استفاده از گچ دارای ۴۵٪ رطوبت، توسعه ساختارهای شکننا را نشان می‌دهد. این مقدار رطوبت گزارش شده از گچ در این مدل‌سازی کمتر از مقدار رطوبت بدست آمده برای حد خمیری گچ مرطوب در این مطالعه (۹۵/۶۵٪ در جدول ۲) است. بنابراین گچ مرطوب با رطوبت‌های زیر حد خمیری به لحاظ ویژگی‌های سنگ‌های شناخته شده‌ی پوسته بالایی دارد. در جدول ۷ خلاصه نتایج حاصل از مدل‌سازی گسل راستالغز با گچ مرطوب و مقادیر رطوبت ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ آورده شده است.

س). از آنجایی که چین‌خوردگی یکی از شواهد دگرشکلی شکل‌پذیر است (Dauteuil and Mart, 1998; Withjack et al, 2007) می‌توان نتیجه گرفت که گچ مرطوب با رطوبت‌های بین حد روانی تا حد خمیری (۱۷۵٪) (جدول-های ۱ و ۲) با توجه به توسعه نوع ساختارها در دارای رفتار شکل‌پذیر است. نتایج به دست آمده از توزیع و فراوانی شکستگی‌های برشی به صورت کاهش تعداد شکستگی‌ها، افزایش فاصله و طول شکستگی‌ها و توسعه غیریکنواخت شکستگی‌ها در نتیجه کاهش رطوبت از ۳۲۰٪ به ۱۷۵٪ به‌طور کیفی دلالت بر کاهش حد الاستیک گچ مرطوب در نتیجه کاهش رطوبت آن دارد؛ به‌طوری که این کاهش حد الاستیک با تأخیر در تشکیل شکستگی‌ها در نتیجه کاهش رطوبت همخوانی دارد (جدول‌های ۴ تا ۶ و نمودارهای شکل ۷). این نتایج با نتایج بدست آمده از آزمایش مندل و همکاران (Mandal et al, 1994) که در آن با کاهش رطوبت پلاستر مرطوب، مقاومت کششی و فواصل شکستگی‌ها افزایش می‌یابد، مطابقت دارد. البته در این نتایج ضخامت پلاستر و نرخ استرین در ایجاد شکستگی و دگرشکلی گچ مرطوب مؤثر است (Mandal et al, 1994; Sæterdal, 2015). با رطوبت ۳۲۰٪ و چسبندگی اندک، تنش صرف افزایش تعداد شکستگی‌ها و کاهش رشدیافتگی آنها می‌شود؛ اما با ۱۷۵٪ رطوبت و چسبندگی زیاد، تعداد شکستگی‌ها کمتر می‌گردد ولی رشدیافتگی و توسعه آنها بیشتر می‌شود. توسعه همزمان شکستگی‌های برشی در سرتاسر مدل در گچ با ۳۲۰٪ رطوبت و با شروع دگرشکلی و حرکت صفحه متحرک نسبت به توسعه غیریکنواخت آنها مکانیکی و کمیت‌های مقاومتی، طبق معیار شکست موهر کولمب، رفتاری مشابه گل‌رس (Clifton et al, 2000)، ماسه (Cotton and Koyi, 2000; Dooley and Schreurs, 2012) و گچ خشک (Van Gent, 2005) و نزدیک به رفتار شکنایی

جدول ۶: نتایج شبیه‌سازی سامانه راستالغز با ۱۷۵٪ رطوبت گچ.

توضیحات	فاصله شکستگی-ها (cm)	میانگین طول شکستگی‌ها (cm)	تعداد شکستگی در مقیاس طول	قطر بیضی کرنش (cm)	دگرشکلی (%)	مقدار جابجایی (cm)
-	-	-	-	۳/۷	۰	۰
بدون شکستگی	-	-	-	۳/۹	۵/۴	۱
تشکیل شکستگی-های $R$	۰/۸	۳	۳ شکستگی	۴/۲	۱۲/۵۲	۲

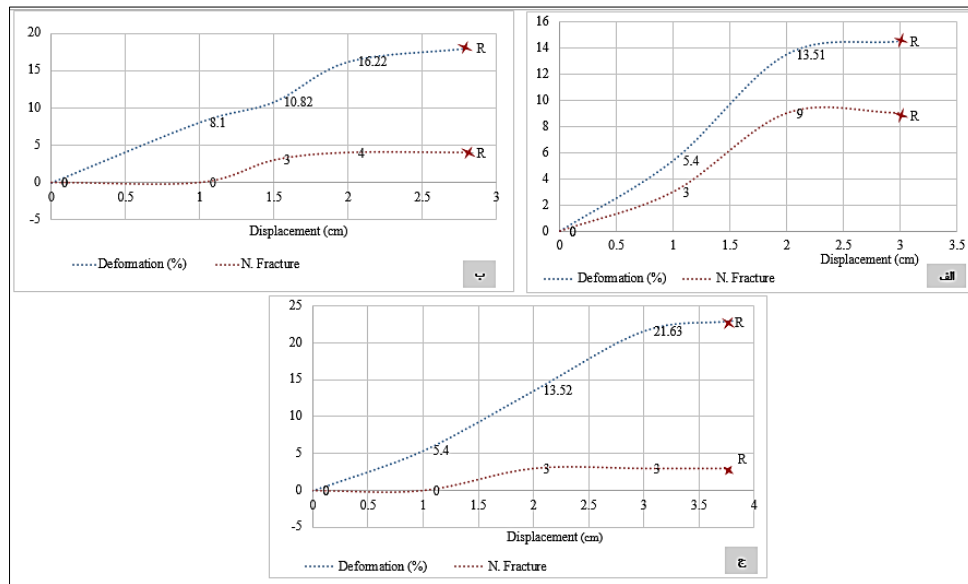
تشکیل محدود شکستگی‌های R'	۱/۹	۴/۵	۳ شکستگی	۴/۵	۲۱/۶۳	۳
-	-	-	-	گسیختگی بیضوی‌های کرنش	-	۴



شکل ۶: الف: بدون جابجایی. ب: تشکیل شکستگی‌های همسوی چپ بر R پس از ۲cm جابجایی. ج: ۳cm جابجایی، توسعه و رشدیافتگی برش‌های R. د: ۴cm جابجایی، تشکیل برش Y موازی با گسل اصلی، برش ناهمسوی R' با زاویه‌ای حدود ۷۰ درجه و همسوی R با زاویه‌ای حدود ۲۵ درجه نسبت به راستای گسل اصلی. س: ۵cm جابجایی، تحول ساختارها از شکل ساده شکستگی‌ها به ساخت‌هایی مانند ساختار بالاچسته (Pop-up structure) و چین‌خوردگی. م: ۶cm جابجایی، نمای کلی ساختارها. در اثر تنش فشارشی پوشش گچ در بخش‌های انتهایی افزایش ضخامت یافته و همچنین هندسه مشابه چین‌خوردگی مرتبط با گسلش راندگی تشکیل شده است.

جدول ۷: خلاصه نتایج حاصل از مدل‌سازی گسل راست‌الغز با ۳۲۰٪، ۲۸۵٪ و ۱۷۵٪ رطوبت گچ.

فاصله شکستگی‌ها (cm)	طول شکستگی‌ها (cm)	تعداد شکستگی‌ها در مقیاس ۳cm	دگرشکلی (%)	مقدار جابجایی (cm)	مقدار رطوبت (%)
-	-	-	-	۰	۳۲۰
۰/۵	۲/۵	۳	۵/۴	۱	
۰/۵	۲/۵	۹	۱۳/۵۱	۲	
-	-	-	-	۳	
-	-	-	-	۰	۲۸۵
-	-	-	۸/۱	۱	
۰/۸	۳	۳	۱۰/۸۲	۱/۵	
۰/۸ - ۰/۵	۴/۵	۴	۱۶/۲۲	۲	
-	-	-	-	۳	
-	-	-	-	۰	۱۷۵
-	-	-	۵/۴	۱	
۰/۸	۳	۳	۱۳/۵۲	۲	
۱/۹	۴/۵	۳	۲۱/۶۳	۳	
-	-	-	-	۴	



شکل ۷: نمودارهای تغییرات درصد دگرشکلی و تعداد شکستگی برشی R در برابر جابجایی، حاصل از مدل سازی های فیزیکی گچ مرطوب با درصد های رطوبت: الف: ۳۲٪، ب: ۲۸.۵٪، ج: ۱۷.۵٪ که در آن ها منحنی آبی رنگ نشان دهنده درصد دگرشکلی و منحنی قرمز تعداد شکستگی و در انتهای نمودار، R نشان دهنده گسیختگی لایه گچ می باشد.

های فیزیکی و مکانیکی گچ مرطوب با رطوبت های زیر حد خمیری (کمتر از ۹.۶٪) نشان داده که چنین گچی به لحاظ ویژگی های مکانیکی، دارای رفتاری مشابه مواد شکنای شناخته شده مانند گچ خشک و ماسه است و بنابراین به عنوان ماده شکل پذیر برای استفاده در مدل سازی های فیزیکی مناسب نمی باشد. مقایسه نتایج مطالعات گذشته و این مطالعه بیانگر رفتار شکل پذیر گچ مرطوب در رطوبت های بین ۹.۶٪ تا ۱۷.۸٪ (حد خمیری تا حد روانی) است که می تواند به عنوان ماده شکل پذیر در آزمایش های مدل سازی فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد. البته این رطوبت هر چه به سمت حد روانی متمایل باشد محدوده دقیق تری را برای بروز رفتار شکل پذیر گچ مرطوب نشان می دهد.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده اند.

### نتیجه گیری

پلاستر یا گچ صنعتی از موادی است که به صورت خشک و مرطوب در مدل سازی ها استفاده شده است. در حالی که پودر خشک پلاستر همانند ماسه و گل رس به عنوان یکی از مواد با رفتار شکنای شناخته شده است؛ اما افزودن رطوبت موجب تغییر در رفتار آن می شود. نتایج بدست آمده از این مطالعه در بررسی شکستگی های برشی ریدل و چین خوردگی های مرتبط با گسل در مدل سازی فیزیکی سامانه گسلش راستالغز نشان داد که وجود رطوبت در گچ مرطوب به میزان حد روانی موجب بروز رفتار شکل پذیری آن می شود. افزایش رطوبت بیش از این مقدار به دلیل کاهش نسبی چسبندگی و ویسکوزیته و افزایش فاصله مولکول ها با کاهش رفتار شکل پذیری گچ مرطوب همراه بوده که این تغییرات با افزایش تعداد شکستگی های برشی ریدل و کاهش توسعه چین خوردگی های مرتبط با گسلش راندگی در آزمایش ها همراه بوده است. نتایج بدست آمده از ویژگی

### References

- Abe, S., Van Gent, H. and Urai, J.L., 2011. DEM simulation of normal faults in cohesive materials: *Tectonophysics*, v. 512, p. 12-21.
- An, L.J., 1998. Development of fault discontinuities in shear experiments: *Tectonophysics*, v. 293, p. 45-59.
- Bahroudi, A. and Koyi, H.A., 2003. Effect of spatial distribution of Hormuz salt in deformation style in the Zagros fold-and-thrust belt: An analog modeling approach, *Journal of the Geological Society, London*,

- v. 160, p. 719-733, doi: 10.1144/0016-764902-135.
- Casas, A.M., Gapais, D., Nalpas, T., Besnard, K. and Romañ-Berdiel, T., 2001. Analogue models of transpressive systems: *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 733-743.
- Clifton, A.E., Schlischeb, R.W., Withjack, M.O. and Ackermann, R.V., 2000. Influence of rift obliquity on fault-population systematics, results of experimental clay models: *Journal of Structural Geology*, v. 22, p. 1491-1509.
- Cotton, J.T. and Koyi, H.A., 2000. Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachments, Application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan: *Geological Society of America Bulletin*, Bulletin; March 2000, v. 112(3), p. 351-363.
- Dauteuil, O. and Mart, Y., 1998. Analogue modeling of faulting pattern, ductile deformation, and vertical motion in strike-slip fault zones: *Tectonics*, v. 17(2), p. 303-310.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, C.F., 2012. *Structural Geology of Rocks and Regions*: New York – Wiley, third edition, 790 p.
- Dooley, T.P. and Schreurs, G., 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics, a review and new experimental results: *Tectonophysics*, v. 1-71, p. 574-575.
- Fossen, H., 2010. *Structural Geology*. United States of America-New York by Cambridge University Press, First Published, 481 p.
- Gibbs, 1983. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics: *Journal of Structural Geology*, v. 5(2), p. 153-160. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90040-8](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(83)90040-8)
- Kratinová, Z., Kratinová, P., Hrouda, F. and Schulmann, K., 2006. Non-scaled analogue modelling of AMS development during viscous flow, a simulation on diapir-like structures: *Tectonophysics*, v. 418, p. 51-61.
- Mandal, N., Deb, S.K. and Khan, D., 1994. Evidence for a non-linear relationship between fracture spacing and layer thickness: *Journal of Structural Geology*, v. 16(9), p. 1275-1281.
- Mansfield, CH. and Cartwright, J., 2001. Fault growth by linkage: observations and implications from analogue models: *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 745-763.
- Okubo, S. and Fukui, K., 1997. Local safety factor applicable to wide range of failure criteria, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 30(4), p. 223-227.
- Pachon-Rodriguez, E.A., Guillon, E., Houvenaghel, G. and Colombani, J., 2014. Wet creep of hardened hydraulic cements Example of gypsum plaster and implication for hydrated Portland cement: *Cement and Concrete Research*, v. 63, p. 67-74.
- Risnes, R. and Korsnes, R.I., 1999. Tensional strength of soft chalk measured in direct and Brazilian tests, *International cong. on rock mechanics*.
- Rutter, E.H., 1986. On the nomenclature of mode of failure transition in rocks: *Tectonophysics*, v. 122, p. 381-387.
- Sæterdal Bøyum, M., 2015. *Plaster Modelling of Fault Development in Extensional Regimes*: MSc-thesis at University of Bergen, Department of Earth Science.
- Sokoutis, D., Corti, G., Bonini, M., Brun, P.J., Cloetingh, S., Mauduit, TH. and Manetti, P., 2007. Modelling the extension of heterogeneous hot lithosphere: *Tectonophysics*, v. 444, p. 63-79.
- Supak, S., Bohnenstiehl, D.R. and Buck, W.R., 2006. Flexing is not stretching: An analogue study of flexure-induced fault populations: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 246, p. 125-137.
- Tavakoli, B., 2011. *Engineering Geology*, Payame-Noor University press, 303 p.
- Van der Pluijm, B.A. and Stephen Marshak, S., 2004. *Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics*, Printed in the United States of America, Second Edition, 673 p.
- Van Gent, H., 2005. Scaled analogue models of normal faulting in brittle lithologies, MSc-thesis at GED/RWTH Aachen, sponsored by Shell Abu Dhabi BV, Utrecht University, Faculty of Geosciences.
- Weijermars, R. and Schmeling, H., 1986. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 43, p. 316-330.
- Withjack, M.O., Schlische, R. and Henza, A.A., 2007. Scaled experimental models of

- extension: dry sand vs. wet clay: *Houston Geological Society Bulletin*, v. 49 (8), p. 31-49.
- Woodcock, N.H. and Fischer, M., 1986. Strike – slip duplexes: *Journal of Structural Geology*, v. 8(7), p. 725-735.
- Yu, Q.L. and Brouwers H.J.H., 2011. Microstructure and mechanical properties of b-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process: *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3149-3157.