

## الگوی رفتاری ریز صفحه‌ای برای سنگ‌های متخلخل

سید امیرالدین صدرنژاد<sup>1</sup>، حسن قاسم‌زاده<sup>2</sup>، احمدعلی خدائی اردبیلی<sup>3</sup>

- 1- استاد گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
- 2- دانشیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
- 3- دانشجوی دکتری خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

[khodaie@dena.kntu.ac.ir](mailto:khodaie@dena.kntu.ac.ir)

### خلاصه

در این مقاله یک الگوی رفتاری ارتجاعی-خمیری در چارچوب نظریه ریز صفحه‌ای برای مدل‌سازی رفتار سنگ‌های متخلخل ارائه شده است. در نظریه ریز صفحه‌ای برخلاف نظریه خمیری کلاسیک برای بیان معادلات رفتاری به جای تانسورهای تنش و کرنش از بردارهای تنش و کرنش بر روی صفحاتی موسوم به ریز صفحات استفاده می‌شود؛ به این وسیله، امکان مدل‌سازی مکانیسم‌های مختلف مرتبط با جهت‌گیری سطوح داخلی مصالح از قبیل ایجاد ترک و لغزش بصورت طبیعی فراهم می‌آید. الگوی رفتاری ارائه شده یک مدل کاملاً صریح بوده و در آن مکانیسم‌های مرتبط با سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی سنگ‌های متخلخل در نظر گرفته شده است. اکثر پارامترهای این مدل دارای مفاهیم فیزیکی بوده و با انجام آزمایش‌های مرسوم مکانیک سنگ قابل تعیین می‌باشند. برای ارزیابی مدل، اقدام به شبیه‌سازی چند آزمایش سه محوری بر روی سنگ آهک و ماسه سنگ شده است. مقایسه نتایج مدل با منحنی‌های آزمایشگاهی حاکی از قابلیت‌های بالای مدل در پیش‌بینی رفتار سنگ‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: معادلات رفتاری، نظریه ریز صفحه‌ای، مدل رفتاری الاستو-پلاستیک، ماسه سنگ، سنگ آهک.

### 1. مقدمه

علی‌رغم پیشرفت‌های بسیاری که تاکنون در زمینه الگوهای رفتاری پیش‌بینی تغییر شکل‌ها و گسیختگی سنگ ارائه شده [5-1]، هنوز مدلی واقع‌بینانه و قدرتمند که تحت شرایط مختلف و در محاسبات پیچیده عددی قابل استفاده باشد ارائه نشده است. برای سنگ‌های متخلخل ترد شکن امکان تعریف ناحیه انتقال رفتار از ترد به انعطاف پذیر وجود دارد. این قبیل سنگ‌ها در فشارهای پایین دارای مود گسیختگی ترد بوده و با افزایش فشار، انعطاف‌پذیری و سخت‌شوندگی رفتار آن‌ها بیشتر می‌شود. همچنین، اعمال تنش‌های تفاضلی در فشارهای بالا منجر به وقوع تراکم ناشی از برش می‌شود. رفتار این قبیل سنگ‌ها در امتدادهای مختلف بسیار وابسته به جهت‌گیری ترک‌ها و نوارهای برشی می‌باشد.

امروزه دو رویکرد مهم برای ارائه الگوهای رفتاری قدرتمندی که منعکس‌کننده جنبه‌های مختلف رفتاری سنگ باشد، (1) توسعه مدل‌های درشت مقیاس و (2) توسعه مدل‌های ریز ساختاری (micro-structure) می‌باشد. مدل‌های درشت مقیاس در فضای تانسورهای تنش-کرنش فرمول‌بندی می‌شوند. آن دسته از الگوهای درشت مقیاس که بر مبنای مکانیک آسیب در محیط‌های پیوسته پایه‌ریزی شده‌اند، عمدتاً قادر به پیش‌بینی مناسب گسیختگی نیستند، زیرا معمولاً گسیختگی به صورت رشد ترک یا اتساع ناشی از برش در یک راستای خاص رخ می‌دهد. مدل‌های درشت مقیاس مبتنی بر اصول ترمودینامیک و متغیرهای داخلی نیز بیشتر جنبه تحقیقاتی داشته و برای کاربردهای عملی چندان مناسب نیستند [3]. در الگوهای ریز ساختاری معادلات رفتاری روی صفحاتی در اطراف نقطه مورد نظر نوشته شده و رفتار کل از طریق انتگرال‌گیری روی این صفحات حاصل می‌گردد. ایده اصلی الگوهای ریز ساختاری نخستین بار توسط تیلور [6] مطرح گردید، او بیان کرد که می‌توان روابط تنش-کرنش را در روی صفحات

<sup>1</sup> استاد گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>2</sup> دانشیار گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>3</sup> دانشجوی دکتری عمران- خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی