کاهش هزینه محاسباتی تحلیل سازه‌های بنایی در مقیاس مزو با استفاده از ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و معیار تسلیم دراگر-پراگر

نیما خرمی [۱]، علی نیکخو [۲*]، علی سعداله [۳]، علی پرمنون [۴]، فرزاد حجازی [۵]

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ تهران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ تهران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ تهران
۴- دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه
۵- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پترا مالزی

پست الکترونیکی نویسندگان:
۱- khorami.nimaa@gmailmailto:shsh۷۰@yahoo.com
۲- nikkoo@usc.ac.ir
۳- sadollah@usc.ac.ir
۴- permanoon.ali@gmail
۵- farzad.hejazi@uwe.ac.uk

چکیده:

مدل‌سازی عددی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو علی‌رغم هزینه محاسباتی بالا، به‌دلیل دقت بالای نتایج، همواره موردتوجه محققان بوده است. در این مقاله رویکرد جدیدی با استفاده از ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و معیار تسلیم در اگر-پراگر برای کاهش حجم محاسبات تحلیل سازه‌های بنایی در مقیاس مزو ارائه شده‌است. در روش پیشنهادی، ابتدا مدل‌های عددی در مقیاس ماکرو با استفاده از معیار تسلیم دراگر-پراگر در چندین گام متوالی تحت تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی قرار می‌گیرند تا نواحی مستعد ترک‌خوردگی شناسایی شوند؛ در ادامه این نواحی در یک مدل عددی بهینه شده در مقیاس مزو و سایر نواحی که مستعد آسیب نیستند در مقیاس ماکرو مدل می‌شوند تا حجم محاسبات کاهش یابد. در ادامه روش پیشنهادی توسط مثال‌های عددی دیوارهای بنایی مورد تایید قرار گرفت؛ به صورتی که حجم محاسبات در مثال اعتبار سنجی ۲۱٪، مثال اول ۱۵/۶٪، مثال دوم ۶۳/۵٪ و در مثال سوم ۵۸.۶٪ کاهش پیدا کرد.

واژگان کلیدی: سازه بنایی، مقیاس ماکرو، مقیاس مزو، بهینه‌سازی، بهینه‌سازی توپولوژی

---

* علی نیکخو، دانشیار دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه علم و فرهنگ تهران
ایمیل: nikkoo@usc.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Reducing Computational Cost of Meso-Scale Analysis of Masonry Structures Using a Combination of Topology Optimization and the Drucker-Prager Yield Criterion

N.Khorami[۱], A.Nikkhoo [۲*], A.Sadollah[۳], A.Permanoon[۴], F.Hejazi[۵]

۱- PhD Student in Structural Engineering, University of Science and Culture, Tehran

۲- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran

۳- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Science and Culture, Tehran

۴- PhD in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah

۵- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Putra University, Malaysia

Abstract:
Modeling masonry structures at the meso-scale, while yielding precise results, is often associated with significant computational costs. This paper introduces an innovative approach that mitigates these costs by integrating topology optimization with the Drucker-Prager yield criterion in meso-scale analysis. The proposed method commences with macro-scale numerical models, employing the Drucker-Prager criterion to account for material behavior under loading. The loading process is segmented into multiple incremental steps. At each step, a fraction of the total load is applied to the model, which subsequently undergoes topology optimization. This optimization aims to maximize structural stiffness while adhering to material distribution constraints. Throughout this process, the stress and strain results of each element are recorded at the conclusion of each step and utilized as inputs for the subsequent step. This iterative approach ensures that the stress and strain outcomes derived from the Drucker-Prager yield surface are incorporated into the stiffness maximization process, facilitating the identification of regions susceptible to damage from plastic strain. The regions pinpointed by the optimization algorithm are accumulated over the course of the analysis, highlighting areas within the masonry structure model that are prone to potential damage. These identified regions are then modeled separately at the meso-scale, while other areas remain modeled at the macro-scale. This dual-scale modeling technique drastically reduces computational costs by minimizing the number of meso-scale elements needed. The efficacy of the proposed method was validated through four numerical examples featuring varied boundary conditions and materials. The algorithm successfully identified potential damage zones, and the optimized models exhibited consistent behavior and crack patterns in comparison to fully meso-scale samples. The reductions in computational costs were significant: ۲۱٪ in the validation model, ۱۵,۶٪ in the first numerical example, ۶۳,۵٪ in the second numerical example, and ۵۸,۶٪ in the third numerical example. This approach demonstrates a substantial advancement in efficiently modeling masonry structures at multiple scales.

Keywords: masonry structures, macro-scale, meso-scale, optimization, topology optimization

۱. مقدمه و تاریخچه تحقیقات

رویدادهای لرزه‌ای اخیر نشان داده‌اند که سازه‌های بنایی نسبت به سایر سازه‌های مهندسی، آمار تلفات جانی و تخریب بالاتری دارند [۱, ۲]؛ از طرفی با توجه به اینکه بیشتر سازه‌های تاریخی با استفاده از مصالح بنایی ساخته‌شده‌اند، انتخاب روش مناسب برای تحلیل و مقاوم‌سازی آن‌ها به‌خصوص در برابر زلزله اهمیت زیادی دارد [۳]. برخلاف سازه‌های فولادی و بتنی که عملکرد آن‌ها با استفاده از دستورالعمل و روش‌های تحلیل موجود قابل بررسی است، رفتار سازه‌های بنایی پیچیده، متغیر و غیرخطی است و ساختار ناهمگنی را تشکیل می‌دهند [۴, ۵]. در گذشته بررسی سازه‌های بنایی توسط آزمایش‌های شبیه‌سازی رفتار صورت می‌گرفت؛ که به‌دلیل هزینه بالا و زمان‌بر بودن این روش، روش‌های عددی و توسعه‌ی آن‌ها به‌عنوان یک راهکار مناسب در شناسایی رفتار دقیق این سازه‌ها مورداستفاده قرار گرفت. برخی از روش‌های عددی که در این زمینه کاربرد فراوان دارد می‌توان روش اجزا محدود[۱] [۶]، روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست [۷] و روش اجزا گسسته[۲] [۸] را نام برد. روش اجزا محدود مؤثرترین و پرکاربردترین روشی است که به‌سادگی در دسترس است و می‌تواند سازه‌های بنایی را تحت شرایط مرزی و مصالح مختلف با در نظر گرفتن جدیدترین روش‌های تحلیل سازه، در سطوح تسلیم غیرخطی تحلیل کند [۹]. در این روش می‌توان سازه‌های بنایی را با توجه به‌دقت نتایج موردنیاز در سه مقیاس میکرو، مزو و ماکرو مدل‌سازی و تحلیل کرد [۱۰, ۱۱]؛ همچنین نتایج این روش را می‌توان برای بهینه‌سازی طراحی سازه‌های بنایی و پیش‌بینی رفتار سازه‌های بنایی موجود استفاده‌کرد [۱۲]. مدل‌های اجزا محدود در مقیاس ماکرو علی‌رغم سادگی و هزینه محاسباتی مناسب نمی‌توانند به‌خوبی رفتار ریز ساختارهای سازه‌های بنایی را بیان کنند [۱۳, ۱۴]. در این مقیاس مجموعه‌ای از رفتار مکانیکی واحد بنایی، ملات و اندر کنش بین ملات و واحد بنایی به‌عنوان رفتار مکانیکی سازه در نظر گرفته‌می‌شود و برای ساده‌سازی روند تحلیل، خصوصیات مصالح در سرتاسر سازه همگن فرض می‌شود[۱۵]. با توجه به رفتار نیمه‌ترد سازه‌های بنایی، آن‌ها در کشش و فشار عملکرد متفاوتی دارند؛ به همین دلیل نواحی دچار خردشدگی و ترک‌خوردگی به‌درستی نمی‌توانند توسط توزیع تنش و کرنش بیان شوند. برای دستیابی به رفتار کلی این سازه‌ها می‌توان از معیار تسلیم دراگر-پراگر در مدل‌سازی عددی مقیاس ماکرو استفاده نمود[۱۶]. این معیار با پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به خوبی میتواند رفتار مصالح ترد و نیمه‌ترد را که در فشار و کشش عملکرد متفاوتی دارند را بیان کند [۱۷]. در تحلیل سازه‌های بنایی در مقیاس مزو رفتار دقیق سازه اهمیت زیادی دارد و به مسیر ترک‌ها و رفتار غیرخطی مصالح توجه زیادی می‌شود. در این مقیاس از المان‌های پیوسته برای واحدهای بنایی و المان‌های تماسی برای مدل‌سازی رفتار ملات استفاده می‌شود [۱۸]. در کنار دقت بالای تحلیل در این مقیاس، به‌دلیل تعداد بالای درجات آزادی، به قدرت کامپیوتری بالایی احتیاج است؛ به‌صورتی که برای مدل‌سازی سازه‌های بنایی در مقیاس واقعی، مدل‌های در مقیاس مزو غیر عملی و غیرواقع‌بینانه هستند و هزینه محاسباتی بالایی دارند [۱۹]. فرایند بهینه‌سازی با توجه به متغیر طراحی، در حالت کلی به سه دسته بهینه‌سازی اندازه، شکل و توپولوژی تقسیم می‌شود [۲۰, ۲۱]. بهینه‌سازی توپولوژی یکی از پرکاربردترین انواع بهینه‌سازی است که هدف اصلی آن یافتن بهترین چیدمان مواد به‌منظور بهینه‌سازی یک تابع هدف با توجه به قیدهای طراحی است [۲۲]. روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی توپولوژی توسط محققین توسعه یافته‌است؛ که روش‌های ماده همسان‌گرد جامد با خطا دهی[۳] (SIMP) [۲۳] و بهینه‌سازی ساختاری تکاملی[۴] (ESO) [۲۴] از پرکاربردترین آنها هستند [۲۵]. روش ESO بر اساس ایده حذف تدریجی مواد غیرضروری از یک سازه عمل می‌کند؛ تا جایی که ساختار نهایی به‌سمت حالت بهینه تکامل پیدا کند. حالت توسعه یافته آن، بهینه سازی ساختاری تکاملی دوجهته[۵] است (BESO) [۲۶] که اجازه می‌دهد تا مواد ناکارآمد از یک سازه حذف شوند و مواد کارآمد به‌طور همزمان اضافه شوند. روش BESO به‌طور

[۱]. Finite Element Method

[۲]. Discrete Element Method

[۳]. Solid Isotropic Material with Penalization

[۴]. Evolutionary Structural Optimisation

[۵]. Bidirectional Evolutionary Structural Optimisation

قابل توجهی استحکام فرآیند حل را در مقایسه با روش ESO افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی توپولوژی کلاسیک بر اساس یک ماده واحد توسعه یافته‌است و در مواجهه با سیستم‌های مرکب، استفاده از این رویکرد همواره چالش‌برانگیز بوده است [۲۸, ۲۷]. برای بهینه‌سازی توپولوژی سازه‌هایی که از دو ماده متفاوت تشکیل‌شده‌اند، معمولاً مواد با راندمان بالا را برای مناطق بحرانی سازه با مقدار تنش یا حساسیت بالا و مواد ناکارآمد را برای قسمت‌های غیر مهمی که مقدار تنش یا حساسیت کم است، تعیین می‌کنند. محققین بر اساس طرح درون یابی مواد و SIMP توانسته‌اند چارچوبی برای انطباق الگوریتم بهینه سازی توپولوژی در ساختارهای چند ماده‌ای ارائه کنند اما با توجه به پیچیدگی این موضوع همچنان مطالعه بر روی انطباق الگوریتم بهینه سازی در ساختارهای چند ماده‌ای ادامه دارد [۲۹-۳۳]. در طی سال‌های گذشته محققین در تلاش بودند تا با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی بر پایه اجزا محدود، رویکردهای جدیدی درزمینه طراحی بهینه سازه‌ها ارائه دهند [۳۴]. در همین راستا محققان در تلاش بوده‌اند تا با ایجاد تعادل بین کمیت‌های سختی و مقاومت به طراحی مطلوب دست‌یابند. کمینه کردن تنش فون میسز[۱] یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در این زمینه است؛ اما استفاده از این رویکرد به‌خصوص در ساختارهای با رفتار ترد، بیشترین تنش در سازه تحت طراحی را ارائه نمی‌دهد [۳۶, ۳۵]. بیشینه‌سازی سختی نیز یکی دیگر از رویکردهای بهینه‌سازی طراحی به‌شمار می‌رود که بر مبنای کمینه‌سازی انرژی کرنشی، در ساختارهایی که با محدودیت سختی مواجه هستند استفاده می‌شود که نتیجه‌ای تقریباً مشابه با الگوی کمینه‌سازی تنش ارائه می‌دهد [۳۷, ۲۳].

در این مقاله یک روش جدید برای کاهش هزینه محاسباتی مدل‌سازی عددی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو ارائه می‌شود؛ به‌صورتی که نمونه‌ها ابتدا با رفتار در اگر-پراگر[۲] الاستیک در گام‌های متوالی تحت تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی قرار می‌گیرند و نواحی مستعد آسیب شناسایی می‌شوند. در ادامه در یک مدل جداگانه این مناطق در مقیاس مزو، و سایر مناطق که احتمال آسیب در آن‌ها کمتر است در مقیاس ماکرو مدل می‌شوند تا حجم محاسبات تحلیل سازه بنایی در مقیاس مزو کاهش یابد.

۲. روش پژوهش

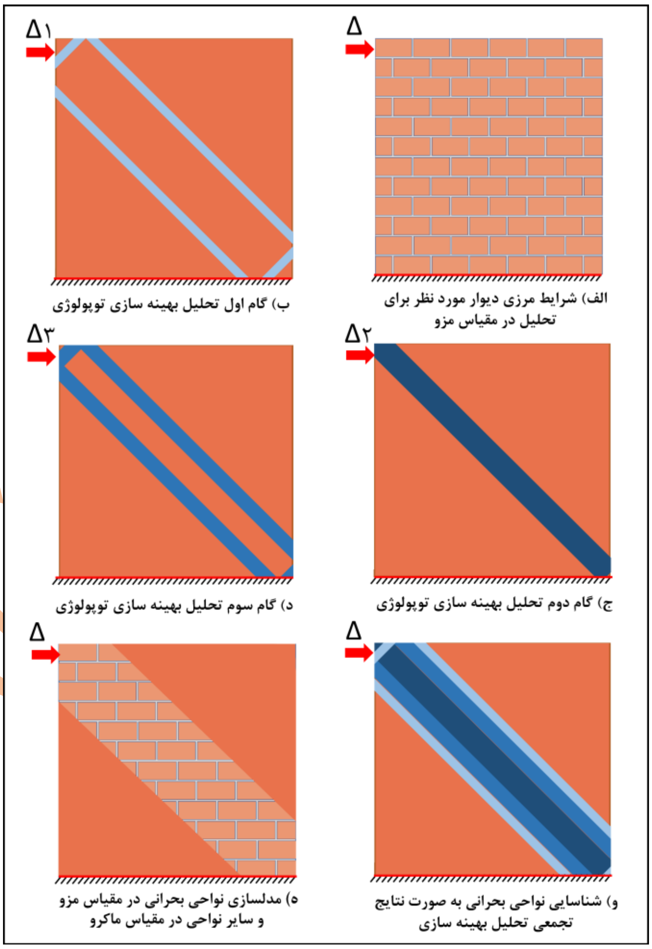
دیوار بنایی شکل (۱ الف) که با شرایط مرزی نشان داده شده در راستای چپ به راست پوش داده شده است. ابتدا دیوار در مقیاس ماکرو با در نظر گرفتن سطح تسلیم دراگر-پراگر برای رفتار غیرخطی آن مدل میگردد. در ادامه مطابق شکل (۲) بارگذاری پوش آور استاتیکی به چند گام با روش جابجایی کنترل تقسیم می‌شود به صورتی که مجموع جابجایی های هرگام معادل جابجایی کلی درنظر گرفته‌شده برای دیوار باشد. در هرگام مدل‌ها تحت تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی با هدف بیشینه سختی و محدودیت توزیع ماده قرار می‌گیرند و المان‌های موثر دارای تنش و کرنش در هر گام شناسایی می‌شوند. در انتهای هر گام نتایج تنش و کرنش هر المان ذخیره شده و به‌عنوان ورودی در گام بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گام بعدی، مدل اجزای محدود دارای تنش و کرنش اولیه ناشی از تحلیل قبلی میباشد (تحلیل اجزای محدود با در نظر گرفتن تنش و کرنش اولیه). الگوریتم کلاسیک بهینه سازی توپولوژی با رفتار خطی صرفا نواحی بحرانی را با توجه به گام ۱ درنظر میگیرد، به عبارتی نواحی که بر اثر کشش ترک خورده اند و همچنین خورد شده‌اند در خروجی الگوریتم مشاهده نمیشود. در این مقاله با ارائه رویکرد غیرخطی، این نواحی شناسایی میشوند و به عنوان نواحی بحرانی ترک‌خوردگی (کشش) یا خوردشدگی (فشار) برای مدل سازی در مقیاس مزو در نظر گرفته میشوند. در روش ارائه شده، با اعمال تنش و کرنش گام قبل به عنوان ورودی، تانسور تنش و کرنش اصلاح شده و شناسایی نواحی بحرانی به صورت غیرخطی انجام میشود. این فرایند توسط کد ورودی توسط کاربر در برنامه اجزا محدود Ansys Apdl اعمال میشود. در ادامه نواحی شناسایی‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت تجمعی ذخیره شده و نواحی مستعد آسیب را در مدل سازه بنایی شکل می‌دهند (شکل ۱-و). درنهایت این نواحی در یک مدل جداگانه در مقیاس مزو و سایر نواحی در مقیاس ماکرو مدل‌سازی شده و مدل بهینه‌شده را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-ه). با توجه به

---

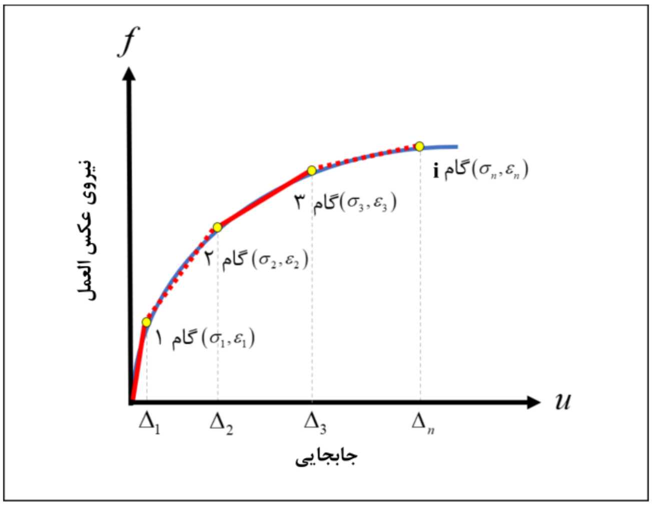
[۱]. Von Mises

[۲]. Drucker-Prager

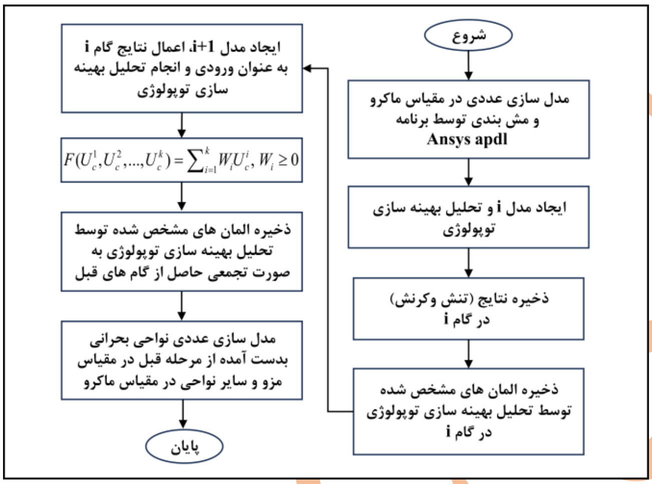
اینکه در مدل‌های مقیاس مزو درجات آزادی بسیار بیشتر از مدل‌های ماکرو است، در مدل



شکل ۱. روند کاهش هزینه محاسباتی تحلیل سازه بنایی در مقیاس مزو توسط بهینه‌سازی توپولوژی



شکل ۲. نحوه عملکرد فرایند بهینه‌سازی برای شناسایی نواحی بحرانی



شکل ۳. فلوچارت کاهش هزینه محاسباتی تحلیل سازه بنایی در مقیاس مزو با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی

بهینه‌شده تعداد المان‌ها و گره‌های مقیاس مزو کاهش‌یافته و جای خود را به المان‌های ماکرو می‌دهند؛ لذا هزینه محاسباتی به مقدار قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند. در شکل (۳) فلوچارت کاهش هزینه محاسباتی تحلیل سازه‌های بنایی در مقیاس مزو به‌صورت منسجم نمایش داده‌شده‌است.

۳. معادلات حاکم

در روش ارائه شده در این مقاله، نواحی بحرانی توسط الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی در مقیاس ماکرو شناسایی شده و در یک مدل بهینه‌شده این نواحی در مقیاس مزو و سایر نواحی در مقیاس ماکرو

مدل می‌شوند. در این بخش ابتدا فرمولاسیون بهینه‌سازی توپولوژی بیان شده و در ادامه رفتار مواد نیمه ترد در معیار تسلیم دراگر-پراگر و مدل سازی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو شرح داده‌می‌شود.

۱.۳. بهینه سازی توپولوژی

هدف اصلی این نوع بهینه سازی پیدا کردن توزیع بهینه از کسر حجمی مشخص شده از مواد در یک دامنه طراحی انتخاب شده با پیدا کردن طرح بهینه از یک سازه در یک محدوده‌ی مشخص شده است[۳۸]؛ در واقع هدف بهینه‌سازی توپولوژی یافتن بهترین چیدمان مواد به‌منظور بهینه‌سازی یک تابع هدف (سختی، فرکانس طبیعی، تنش) با توجه به قیدهای طراحی است. فرم عمومی مسئله بهینه سازی توپولوژی به صورت زیر است:

$$OBJ = a\ minimum/maximum\ \eta_i$$
$$s.t \begin{cases} 0<\eta_i \le 1 \quad (i=1,\ 2,\ 3,\ ....,\ N) \\ \underline{CON_j} \le CON_j \le \overline{CON_j} \quad (j=1,\ 2,\ 3,\ ....,\ N) \end{cases} \qquad (۱)$$

بهینه‌سازی توپولوژی به دنبال کمینه یا بیشینه کردن تابع هدف (OBJ) است که به محدودیت‌های تعیین‌شده (CON) وابسته است. در رابطه (۱)، (η_i) متغیرهای طراحی هستند و به هر المان اجزای محدود (i) در مسئله توپولوژی اختصاص داده می‌شوند. N تعداد المان‌ها، M تعداد قیدهای طراحی، $\underline{CON_j}$ حد پایین، $\overline{CON_j}$ حد بالا و CON_j مقدار محاسبه شده قید طراحی مرحله j است.

۲.۳. بهینه‌سازی توپولوژی بر مبنای بیشینه سختی استاتیکی با محدودیت حجم

در الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی، کمینه کردن تنش یا بیشینه سختی، منجر به جواب‌های تقریباً یکسانی می‌شود؛ ازاین‌رو در این مقاله از روش بیشینه سختی با کمترین مقدار ماده مصرفی برای شناسایی مناطق بحرانی استفاده شد. با توجه به اینکه دست‌یابی به بیشینه سختی، معادل کمینه شدن انرژی سازه است، فرمولاسیون کلی بهینه‌سازی توپولوژی بر مبنای بیشینه سختی برای شناسایی مناطق بحرانی به‌صورت زیر بیان می‌شود [۳۶, ۳۹].

$$\begin{aligned} &U_c = a\,minimum\,\eta_i \\ &subject\,to\; 0<\eta_i \le 1 \;\; (i=1,2,3,...,N) \\ &V \le V_0 - V^* \end{aligned} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) η ضریب بهینه‌سازی هر المان، V حجم مدل اجزا محدود، V_0 حجم اولیه و V^* مقدار ماده‌ای که باید حذف شود است. بهینه‌سازی توپولوژی ممکن است بر اساس یک یا چند ترکیب بارگذاری باشد. بر این اساس مقدار سختی موردنیاز (K) در هر ترکیب بارگذاری با اعمال ضریب وزنی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F(U_c^1, U_c^2, ..., U_c^k) = \sum_{i=1}^{k} W_i U_c^i,\ W_i \ge 0 \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، W_i مقدار ضریب وزنی هر ترکیب بارگذاری بر اساس U_c است. در ادامه حجم کلی المان‌ها بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} &V = \sum_i \eta_i V_i \\ &[E] = [E(\eta_i)]\{\sigma_i\} = [E]\{\varepsilon_i\} \end{aligned} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) V_i حجم المان i ام است. با توجه به اینکه مقدار تانسور مدول الاستیسیته به تانسور هر المان وابسته‌است، تانسور مدول الاستیسیته به تانسور تنش و کرنش وابسته خواهد شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت المان‌های موردنیاز در یک مسئله دارای بیشترین تنش و کرنش خواهند بود و امکان گسترش ترک در این نواحی بیشتر است. با توجه به ایزوتروپیک[۱] فرض شدن مدل‌های عددی سازه‌های بنایی در مقیاس ماکرو، این وابستگی به جهت تنش یا کرنش محدود نمی‌شود و در تمامی جهات به صورت یکنواخت عمل می‌کند. الگوریتم بهینه سازی توپولوژی بصورت معمول در حالت "بیشینه سختی استاتیکی با محدودیت حجم" در روابط (۴-۲)، از سطوح تسلیمی همانند فون میسز با رفتار یکسان در کشش و فشار استفاده میکنند. بنابراین زمانیکه رفتار ماده در کشش و فشار یکسان نمیباشد الگوریتم بهینه‌سازی توپولوژی دارای دقت مناسبی نمیباشد. ازاین رو در این مقاله از سطح تسلیم دراگر-پراگر برای تحلیل مدل‌های اجزای محدود استفاده شد تا در هنگام کمینه شدن

۱ Isotropic

انرژی کرنشی در الگوریتم بهینه سازی رفتار نیمه ترد (یکسان نبودن مقاومت کششی و فشاری) مصالح در نظر گرفته شود. به صورتی که فرایند بهینه‌سازی به چند گام تقسیم شده و تنش کرنش هرگام به عنوان ورودی در گام بعد لحاظ میشود. در این حالت تانسور تنش کرنش در رابطه (۴) اصلاح شده و تانسور کرنش اولیه ($\varepsilon_{ij}^{initial}$) مطابق رابطه (۵) در تانسور تنش کرنش لحاظ میشود.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{E} + \varepsilon_{ij}^{initial} + \varepsilon_{ij}^{T} \qquad (۵)$$

۳.۳ رفتار مواد نیمه ترد در معیار تسلیم دراگر-پراگر

با توجه به رفتار نیمه ترد سازه‌های بنایی، برای پیش بینی رفتار کلی این سازه‌ها می‌توان از معیار تسلیم دراگر-پراگر در مدل‌سازی عددی مقیاس ماکرو استفاده نمود [۱۶] این معیار در سال ۱۹۵۲ [۴۰] مطابق رابطه (۶) فرموله شد.

$$F(\sigma) = \alpha J_1(\sigma) + \sqrt{J_2(\sigma)} - H \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، J_1, J_2 ثابت‌های اول و دوم تانسور تنش انحرافی هستند؛ همچنین α, H ثابت‌های معیار دراگر-پراگر هستند؛ که بر اساس مشخصات مصالح تغییر می‌کنند. آن‌ها را می‌توان توسط پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) به‌شکل رابطه (۷) بیان کرد [۱۸][۴۱].

$$\alpha = \frac{2\sin(\phi)}{\sqrt{3}(3-\sin(\phi))}, \quad H = \frac{6C\cos(\phi)}{\sqrt{3}(3-\sin(\phi))} \qquad (۷)$$

برخی از مواد مانند بتن و منشور بنایی، ممکن است توسط مقاومت فشاری (f'_m) و مقاومت کششی (f_t) تعریف شوند؛ در این حالت با جاگذاری وضعیت تنش‌های اصلی به‌صورت $(\sigma_1 = \sigma_2 = 0,\ \sigma_3 = -f'_m)$ و $(\sigma_1 = f_t,\ \sigma_2 = \sigma_3 = 0)$ در رابطه (۶)، رابطه (۸) حاصل می‌شود [۱۸].

$$\begin{cases} -\alpha f'_m + \frac{1}{\sqrt{3}} f'_m - H = 0 \\ \alpha f_t + \frac{1}{\sqrt{3}} f_t - H = 0 \end{cases} \qquad (۸)$$

با حل رابطه (۸)، ثابت‌های α, H به‌شکل رابطه (۹) بر اساس مقاومت فشاری و کششی تعریف می‌شوند:

$$\alpha = \frac{f'_m - f_t}{\sqrt{3}(f'_m + f_t)}, \quad H = \frac{2 f'_m f_t}{\sqrt{3}(f'_m + f_t)} \qquad (۹)$$

در نهایت با برابر قرار دادن روابط (۷) و (۹)، می‌توان پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی (برحسب MPa) را طبق رابطه (۱۰) بر اساس مقاومت فشاری و کششی تعریف نمود.

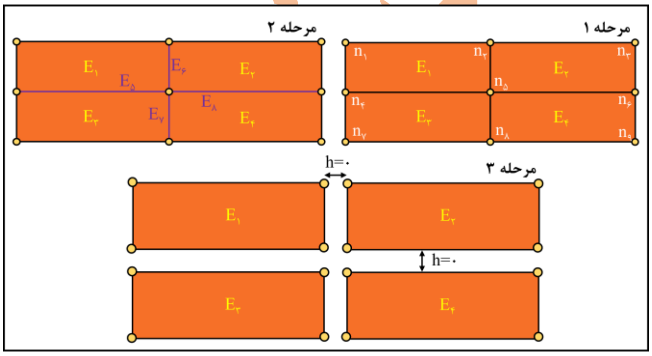
$$\phi = \mathrm{Sin}^{-1}\left(\frac{3(f'_m - f_t)}{3 f'_m + f_t}\right), \quad C = \frac{f'_m f_t (3-\sin(\phi))}{3\cos(\phi)(f'_m + f_t)} \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰) پارامترهای f'_m ، f_t از نتایج آزمایشگاهی استخراج می‌شوند؛ با این وجود در صورتی که مقدار مقاومت کششی در دسترس نباشد می‌توان از رابطه (۱۱) استفاده‌کرد [۱۹].

$$0.03 f'_m < f_t < 0.09 f'_m \qquad (۱۱)$$

۴.۳ مدل‌سازی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو

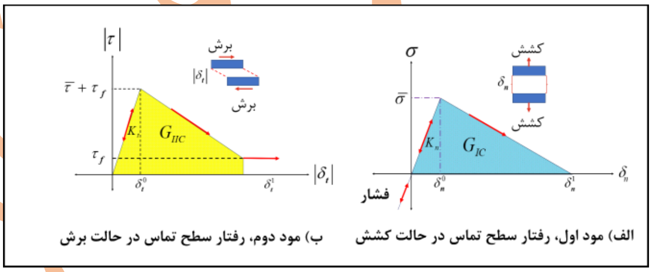
در مدل‌سازی سازه‌های بنایی در مقیاس مزو روش گسسته سازی تکه‌ای[۱] (MFT) کاربرد دارد. این رویکرد منجر به کاهش قابل‌توجه زمان و هزینه محاسباتی در مقایسه با روش‌های مش‌بندی یکنواخت می‌شود. در این روش، واحد بنایی، درزهای افقی و قائم و المان تماسی بین واحدهای بنایی به‌صورت مزو مدل می‌شوند. مراحل انجام گسسته سازی تکه‌ای در شکل (۴) نشان داده‌شده‌است.



شکل ۴. روند گسسته سازی تکه‌ای در مدل‌سازی عددی نواحی بحرانی در مقیاس مزو

[۱] Mesh fragmentation technique

برای در نظر گرفتن رفتار ملات در بین آجرها، از مدل ناحیه چسبندگی[1] (CZM) [۴۲] استفاده شد. این مدل گسترش ترک را بر مبنای قانون تنش- جدایش مدل‌سازی میکند و پیدایش شکست به عنوان یک پدیده تدریجی در نظر گرفته می‌شود. جزئیات بیشتر مدل CZM در مراجع [۴۴-۴۲] بیان شده‌است. در این مقاله با توجه به شکل (۵) در مدل CZM از رفتار دو خطی برای محاسبه تنش نرمال و برشی بین المان‌ها استفاده شد [۴۵] (روابط ۱۲-۱۵). در این مدل، رفتار در فشار به صورت خطی در نظر گرفته میشود. اما با توجه به اینکه مجموعه واحد بنایی و ملات عملکرد نهایی رفتار را منشور بنایی در مقیاس مزو را تعیین میکنند، رفتار مجموعه منشور بنایی در کشش و برش از CZM و در فشار مطابق معیار تسلیم واحد بنایی عمل میکند.



شکل ۵. تصویر مود اول و دوم مدل CZM در مدل‌سازی سطح تماس واحدهای بنایی

$$\sigma=\begin{cases}\dfrac{\bar{\sigma}}{\delta_n^0}\delta_n, & \text{if } \delta_n<\delta_n^0\\ \dfrac{\delta_n^1-\delta_n}{\delta_n^1-\delta_n^0}\bar{\sigma}, & \text{if } \delta_n^0<\delta_n<\delta_n^1\\ 0, & \text{if } \delta_n\geq\delta_n^1\end{cases} \tag{۱۲}$$

$$|\tau|=\begin{cases}\dfrac{\delta_t}{\delta_t^0}(\bar{\tau}+\tau_f), & \text{if } |\delta_t|<\delta_t^0\\ \dfrac{\delta_t^1-\delta_t}{\delta_t^1-\delta_t^0}(\bar{\tau}+\tau_f), & \text{if } \delta_t^0<|\delta_t|<\delta_t^1\\ \tau_f, & \text{if } |\delta_t|\geq\delta_t^1\end{cases} \tag{۱۳}$$

$$\tau_f=\begin{cases}-\mu\sigma & \text{if } \sigma<0\\ 0 & \text{if } \sigma>0\end{cases} \tag{۱۴}$$

$$D=\sqrt{\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^2+\left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^2} \tag{۱۵}$$

در روابط (۱۲ تا ۱۵)، $\bar{\sigma},\bar{\tau}$ به‌ترتیب مقدار مقاومت برشی و کششی المان تماسی، δ_n,δ_t مقادیر جدایش المان تماسی در راستای نرمال و برشی، δ_n^0,δ_t^0 مقادیر نرمال و برشی اولین جدایش ماندگار و δ_n^1,δ_t^1 مقدار نرمال و برشی جابه‌جایی در انتهای خرابی می‌باشند. در رابطه (۱۵)، G_{IC},G_{IIC} به‌ترتیب نرخ رهایی انرژی بحرانی در کشش و برش (چقرمگی شکست)، G_I,G_{II} به‌ترتیب مقدار انرژی جذب‌شده در راستای نرمال و برشی و درنهایت D شاخص خسارت است که مقداری بین ۰ تا ۱ دارد.

۴. مدل‌های عددی

برای تایید رویکرد ارائه‌شده ابتدا یک نمونه دیوار برشی به‌منظور اعتبار سنجی و در ادامه به‌منظور روشن‌تر شدن موضوع، سه نمونه دیوار بنایی با شرایط مرزی و مصالح مختلف، موردبررسی قرار گرفتند. تمامی مدل‌ها در دو حالت با مقیاس‌های " مزو " و " بهینه‌شده " مدل‌سازی و از نظر دقت نتایج و هزینه محاسباتی با هم مقایسه شدند. با توجه به فلوچارت شکل (۳)، روند ساخت مدل‌بهینه شده در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول یا گام‌های بهینه‌سازی، مدل‌ها در مقیاس ماکرو و رفتار دراگر- پراگر تحت بهینه‌سازی توپولوژی قرار گرفتند. در ادامه پس از شناسایی نواحی بحرانی، در بخش‌های ماکرو مدل بهینه‌شده نیز از معیار دراگر-پراگر استفاده شد. برای بخش‌های مزو مدل بهینه‌شده و همچنین مدل‌های عددی مقیاس مزو از معیار منتری-ویلام برای آجرها و مدل CZM مطابق بخش ۳.۴ برای رفتار ملات استفاده شد. در جدول (۱) مدل‌های رفتاری و المان‌های مورداستفاده برای هر مرحله در مدل بهینه‌شده نشان داده‌شده‌است. در مقایسه هزینه محاسباتی تعداد معادلات مدل‌های عددی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است برای مقایسه دقیق، مجموع

[1]. Cohesive zone model

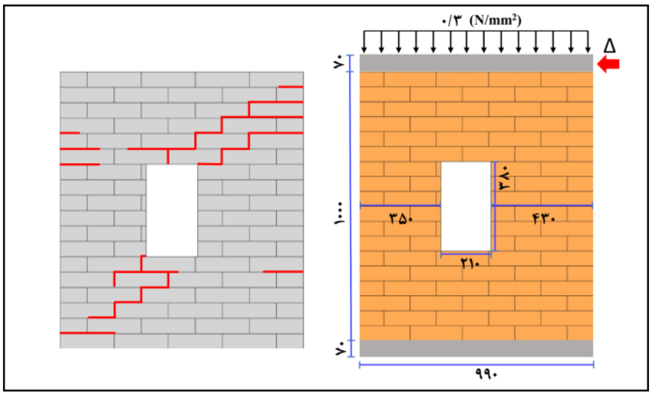
هزینه محاسباتی گام‌های بهینه‌سازی و مدل بهینه‌شده با مدل مزو مقایسه شده‌است.

جدول ۱. مشخصات رفتار و المان‌های مدل‌های بهینه‌شده

مرحله	مقیاس	بخش	مدل رفتاری	نوع المان
اول	ماکرو	کل دیوار	دراگر-پراگر	SOLID ۶۵
دوم	ماکرو	نواحی کم‌اهمیت	دراگر-پراگر	SOLID ۶۵
	مزو	آجر	منتری-ویلام	PLANE۱۸۲
		ملات	CZM	CONTA۱۷۲ Target۱۶۹

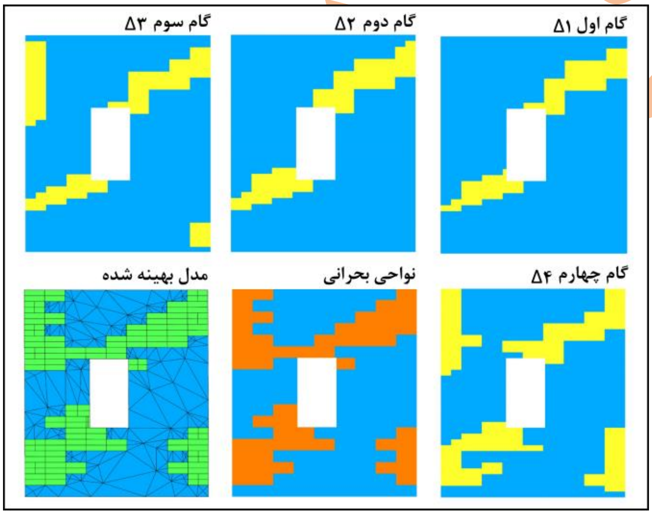
۱.۴. مثال اعتبار سنجی

در این مثال بررسی روند ارائه شده توسط نمونه دیوار برشی بازشو دار ارائه شده‌است. دیوار در سال ۱۹۹۲ توسط Vermeltvoort و همکارانش [۴۶] به‌صورت شبه استاتیکی آزمایش شد و اساس کار بسیاری از محققین برای مطالعه سازه‌های بنایی و مدل‌های عددی قرار گرفت [۴۸][۴۷]. این دیوار به ضخامت ۱۰۰ *mm*، ۱۰۰۰ *mm* ارتفاع و ۹۹۰ *mm* عرض دارد؛ که یک بازشو در وسط آن به‌صورت نامتقارن تعبیه شده و یک سربار ثابت به مقدار ۰/۳ *Mpa* در بالای آن قرار دارد. در شکل(۶) شرایط مرزی و الگوی ترک‌خوردگی این دیوار نمایش داده‌شده‌است.

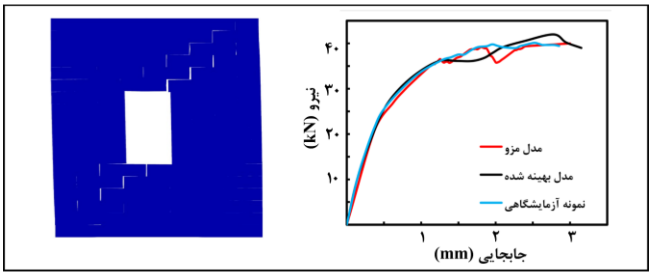


شکل ۶. شرایط مرزی و الگوی ترک‌خوردگی مدل دیوار برشی (ابعاد برحسب میلی‌متر)

در جدول (۲) مشخصات مصالح مدل‌های عددی دیوار برشی طبق مرجع اصلی نمایش داده‌شده‌است. برای شناسایی نواحی بحرانی توسط الگوریتم ارائه شده، بارگذاری کلی دیوار به چند گام دلخواه تقسیم شد. با توجه به اینکه حداکثر جابجایی دیوار طبق نتایج آزمایشگاهی ۳ میلیمتر به دست آمده است، درگام اول دیوار با رفتار دراگر-پراگر به مقدار ۰/۷۵ میلیمتر در راستای راست به چپ پوش داده شد و به صورت همزمان تحلیل بهینه سازی انجام گرفت. در انتهای فرایند گام اول، المان های بحرانی شناسایی‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، و مقدار تنش وکرنش هر المان که با توجه به معیار دراگر-پراگر بدست آمده‌اند ذخیره شدند. در گام دوم، دیوار در یک مدل جداگانه مجدد به میزان ۰/۷۵ میلیمتر پوش داده شد و تنش کرنش گام اول، به عنوان تنش کرنش اولیه در شروع فرایند به المان ها اختصاص داده شد و مجدد تحلیل بهینه سازی انجام شد. وارد کردن تنش و کرنش حاصل از گام قبل در گام بعد باعث میشود تحلیل بهینه سازی توانایی شناسایی مناطقی که به صورت کششی تسلیم میشوند را نیز داشته باشد. در ادامه پس از اتمام فرایند بهینه‌سازی، نواحی بحرانی شناسایی شده در هرگام بهینه‌سازی به صورت تجمعی ذخیره و مدل بهینه‌شده ساخته شد. در شکل (۷) روند ساخت مدل بهینه‌شده نمایش داده‌شده‌است. سپس دیوار در مقیاس مزو مدلسازی و تحلیل شد و نتایج آن با مدل بهینه‌شده مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۸) الگوی ترک‌خوردگی مدل مزو و نمودار نیرو-



شکل ۷. روند ساخت مدل عددی بهینه‌شده در مثال دیوار برشی

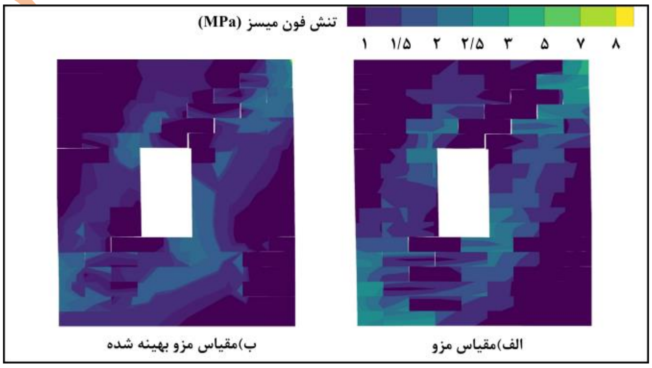


شکل ۸. نمودار نیرو جابه‌جایی مدل‌های عددی در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی به‌همراه الگوی ترک‌خوردگی مدل مزو

جابه‌جایی مدل‌های عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌شده‌است. با توجه به شکل (۸) تطابق مناسبی بین رفتار مدل بهینه‌شده در مقایسه با مدل مزو و نمونه آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. بیشتر بودن سختی اولیه و حداکثر نیرو در مدل بهینه‌شده ناشی از رفتار الاستیک پرفکتو پلاستیک[1] المان‌های ماکرو است. هر مقدار المان‌های ماکرو در مدل عددی بیشتر باشند، سختی اولیه بیشتر خواهد بود. در شکل (۹) الگوی ترک‌خوردگی و کانتور توزیع تنش فون میسز مدل بهینه‌شده در مقایسه با مدل مزو نشان داده‌شده‌است.

جدول ۲. مشخصات مصالح مثال دیوار برشی

بخش	E (Gpa)	ν	C (Mpa)	ϕ $(°)$	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	f_t (MPa)	f'_m (MPa)
منشور بنایی	۸/۷	۰/۱۴	۰/۲۵	۳۶	–	–	۰/۲۵	۱۰/۵
ملات	۷/۸۲	۰/۱۴	–	–	۰/۰۱۸	۰/۱۲۵	–	–
آجر	۱۶/۷	۰/۱۵	–	–	–	–	–	–



شکل ۹. الگوی ترک‌خوردگی و کانتور تنش فون میسز در مدل بهینه‌شده و مدل مزو

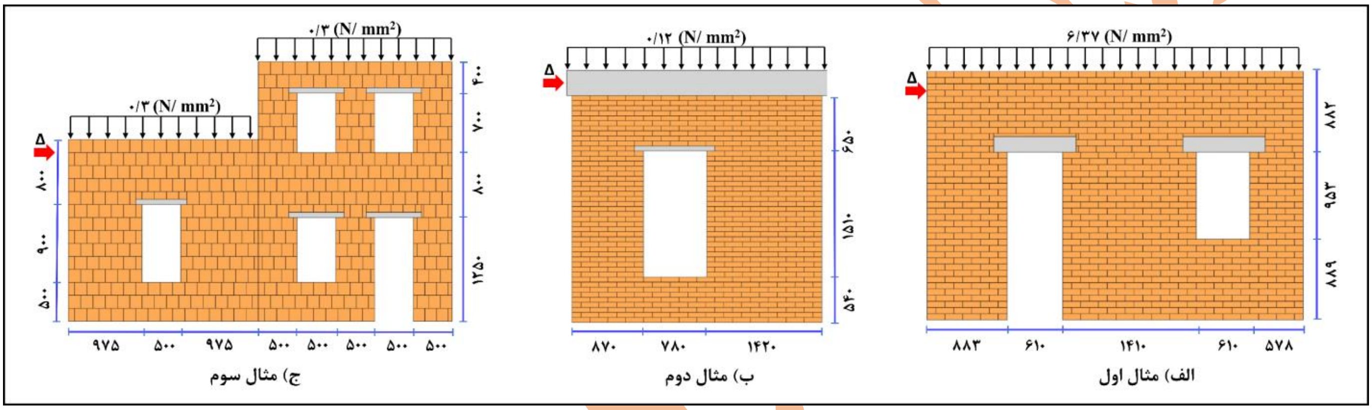
در شکل (۹) مدل مزو و بهینه‌شده تطابق مناسبی در الگوی ترک‌خوردگی و توزیع کانتور تنش نشان می‌دهند. به‌صورتی که ترک‌های قطری و تمرکز تنش در بالا و پایین قسمت بازشو در مدل بهینه‌شده به‌خوبی مشهود است؛ که نمایانگر کارکرد صحیح الگوریتم ارائه شده‌است. هزینه محاسباتی در مدل بهینه‌شده به‌صورت مؤثری کاهش پیدا کرده است. در اینجا منظور از هزینه محاسباتی تعداد معادلاتی است که مورد محاسبات قرار می‌گیرند؛ که با توجه به نوع تحلیل، شرایط مرزی سازه، مصالح، نوع المان و اندازه مش بندی متغیر است. تعداد معادلات با ضرب تعداد گره‌های هر المان در تعداد درجات آزادی آن محاسبه می‌شود. در این مثال در مدل مزو تعداد ۱۴۵۸۰ معادله مورد محاسبه قرار گرفت. از طرفی در مدل بهینه‌شده ۹۵۲۰ معادله و برای چهار گام بهینه‌سازی درمجموع ۱۹۴۴ معادله محاسبه شد؛ که کاهش ۲۱/۳ درصدی حجم محاسبات مقیاس بهینه‌شده نسبت به مقیاس مزو را نشان‌می‌دهد.

۲.۴. مثال‌های عددی

در این بخش سه نمونه دیوار بنایی با شرایط مرزی مختلف برای درک بهتر روش ارائه‌شده به‌صورت عددی در مقیاس‌های مزو و مزو بهینه‌شده بررسی شد. شرایط مرزی دیوارها در شکل (۱۰) نمایش داده‌شده‌است. مثال اول یک وجه از یک سازه بنایی یک طبقه بازشو

[1]. Elastic perfectly plastic

دار است که در سال ۲۰۰۶ توسط Paquette و همکارانش[۴۹] به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. این دیوار به ارتفاع ۲۷۲۴ mm و عرض ۴۰۹۱ mm یک وجه از یک سازه بنایی متقارن است که mm ۱۹۰ ضخامت دارد و بار قائم با شدت ۶/۳۷ N/mm^2 در بالای آن قرار دارد. در شکل (۱۰-الف) شرایط مرزی دیوار موردنظر نمایش داده‌شده‌است. اطلاعات تکمیلی این دیوار را می‌توان در مراجع مشاهده کرد [۵۰, ۵۱]. مثال دوم یک دیوار برشی به ضخامت mm ۱۰۰، ارتفاع ۳۰۷۰ mm و عرض ۲۶۹۰ mm است؛ که یک بازشو به‌صورت نامتقارن در آن در نظر گرفته شده‌است. این دیوار به‌منظور تأثیر بهسازی دیوارهای دارای ترک در سال ۲۰۲۰ توسط Drougkas و همکارانش [۵۲] به‌صورت آزمایشگاهی و عددی موردمطالعه قرار گرفت. برای این دیوار یک سربار ثابت با شدت ۰/۱۲ N/mm^2 در نظر گرفته شده‌است. در شکل (۱۰-ب) ابعاد و شرایط مرزی دیوار مثال دوم نمایش داده‌شده‌است. برای مثال سوم یک وجه از یک سازه بنایی دوطبقه در نظر گرفته شده‌است که در سال ۲۰۲۳ توسط Gagliardo و همکارانش [۵۳] به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی شد. این دیوار با ضخامت ۳۰۰ mm از دو بخش مجزا تشکیل شده‌است؛ که بخش اول ۲۴۵۰ mm عرض و ۲۲۰۰ mm ارتفاع دارد و یک بازشو در وسط آن تعبیه شده‌است. بخش دوم با ۲۵۰۰ mm عرض و ۳۱۵۰ mm ارتفاع در دو طبقه

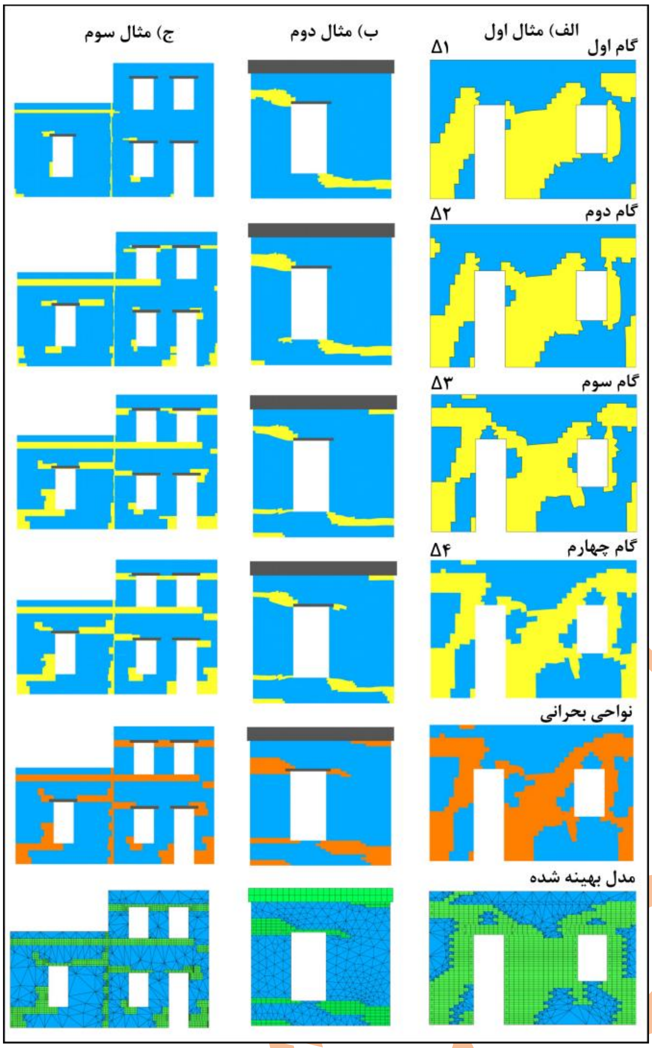


شکل ۱۰. ابعاد و شرایط مرزی مثال‌های عددی (ابعاد برحسب میلی‌متر)

جدول ۳. مشخصات مصالح مثال‌های عددی

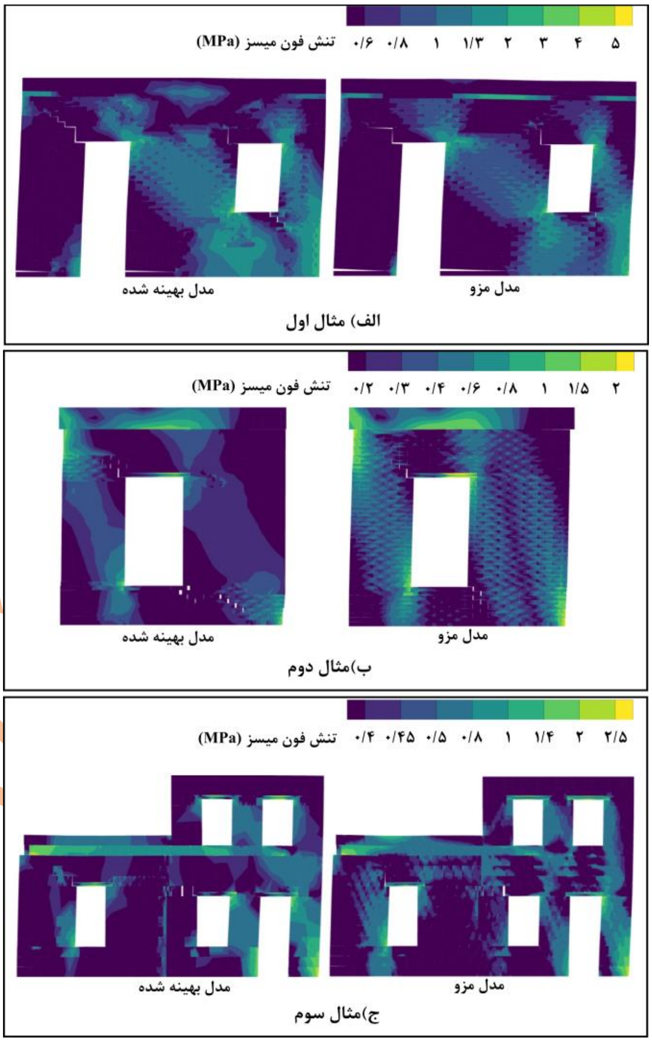
مثال عددی	بخش	E (Gpa)	ν	C (Mpa)	ϕ $(^\circ)$	G_I (N/mm)	G_{II} (N/mm)	f_t (MPa)	f'_m (MPa)
مثال اول	منشور بنایی	۱۸/۸	۰/۲	۰/۰۷۸	۳۲	–	–	۰/۱۸	۲۲/۲
	ملات	۶/۵	۰/۲۲		–	۰/۰۰۱۷	۰/۰۱	–	–
	آجر	۲۰	۰/۱۸	–	–	–	–	–	–
مثال دوم	منشور بنایی	۳/۲	۰/۲	۰/۳	۳۵	–	–	۰/۰۸	۱۳
	ملات	۱/۰۵	۰/۲	–	–	۰/۰۰۷	۰/۰۱۳	–	–
	آجر	۸	۰/۱۵	–	–	–	–	–	–
مثال سوم	منشور بنایی	۳/۴۶	۰/۱۸	۰/۲۳	۵۶	–	–	۰/۱۷	۱/۳
	ملات	۲/۲	۰/۲	–	–	۰/۰۰۵	۰/۰۳	–	–
	آجر	۵/۴	۰/۱۵	–	–	–	–	–	–

بازشو دار در مجاورت قسمت اول قرار دارد. در این دیوار بار قائم با شدت ۰/۳ N/mm^2 به‌صورت یکنواخت در بالای هر دو قسمت اعمال شده‌است. در شکل (۱۰-ج) ابعاد و شرایط مرزی مثال سوم نمایش داده‌شده‌است. تمامی مثال‌ها با شرایط مرزی ذکرشده و مشخصات مصالح جدول (۳) ابتدا در مقیاس ماکرو مدل‌سازی شدند و در چهار گام متوالی تحت تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از نواحی شناسایی‌شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی، مدل‌های بهینه‌شده ساخته شد و نتایج آن‌ها با مدل‌های مزو مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۱۱) روند شناسایی نواحی بحرانی و ساخت مدل بهینه‌شده در مثال‌های عددی نشان داده‌شده‌است. در شکل (۱۲) الگوی ترک‌خوردگی و کانتور تنش فون میسز مدل بهینه‌شده و مدل مزو در مثال‌های عددی نشان داده‌شده‌است. همان‌طور که در مدل‌های بهینه‌شده مشاهده می‌شود، نواحی مستعد آسیب به‌خوبی توسط الگوریتم شناسایی‌شده‌اند و جدایش بین واحدهای بنایی در هر سه مثال در مدل بهینه‌شده به‌خوبی مشهود است. تطابق بین الگوهای ترک‌خوردگی مدل بهینه‌شده و مدل مزو، بیانگر این است که می‌توان با در نظر گرفتن صرفاً مدل بهینه‌شده در مدل‌سازی سازه‌های بنایی، در کنار نتایج با دقت بالا از هزینه پایین محاسباتی نیز بهره برد. در دیوار مثال اول مطابق شکل (۱۲-الف)، جدایش واحدهای بنایی در گوشه بالای هر دو بازشو به‌خوبی مشهود است؛ همچنین در پایین دیوار نیز ترک‌های کششی به‌خوبی مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۱. گام‌های تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی و ساخت مدل‌های بهینه مثال‌های عددی توسط نتایج تجمعی گام‌های بهینه‌سازی

در نواحی آسیب‌دیده به‌دلیل جدایش المان‌ها تنش منتقل نمی‌شود؛ درحالی‌که مناطقی که پس از ترک‌خوردگی سازه در انتقال نیرو شرکت کرده و دچار شکست نشده‌اند جریان تنش را تا تکیه‌گاه منتقل می‌کنند. به‌دلیل راستای چپ به راست بودن پوش، قسمت پایینی دیوار در سمت چپ دچار ترک‌خوردگی شده و انتقال نیرو در آن ناحیه متوقف شده‌است؛ درحالی‌که قسمت پایین در سمت راست تمرکز تنش را نمایش می‌دهد. نتایج بیان‌شده در مثال‌های دوم و سوم نیز مشاهده می‌شود، به‌صورتی که با توجه به‌شکل‌های (۱۲-ب) و (۱۲-ج)، تطابق الگوی ترک‌خوردگی و توزیع تنش فون میسز در مدل مزو و مدل بهینه‌شده آن‌ها مشاهده می‌شود.

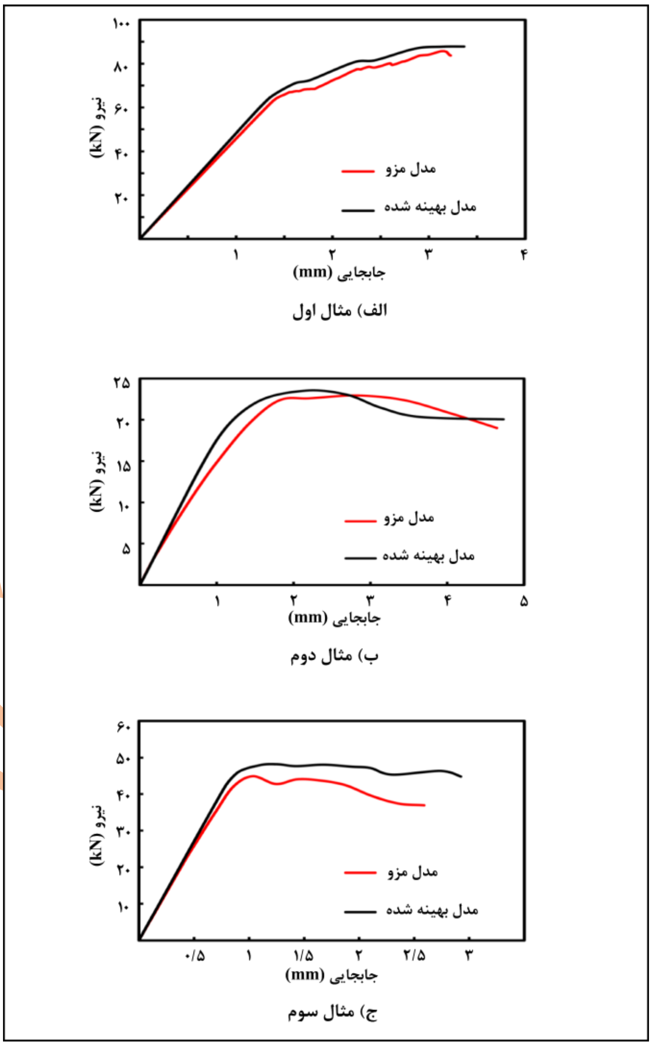


شکل ۱۲. الگوی ترک‌خوردگی و کانتور تنش فون میسز در مثال‌های عددی

لازم به ذکر است در مثال دوم و سوم نیز به‌خوبی توقف نیرو در المان‌های آسیب‌دیده و تمرکز تنش در المان‌های هدایت‌کننده جریان نیرو به‌خوبی مشهود است. در شکل (۱۳) نمودار نیرو-جابه‌جایی مثال‌های عددی نمایش داده‌شده‌است. در این شکل تطابق مناسبی بین نمودارهای مدل‌های بهینه‌شده و مدل‌های مزو مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است بیشتر بودن سختی و بیشینه نیروی اولیه در مدل‌های بهینه‌شده نسبت به مدل‌های مزو ناشی از وجود بخش‌های ماکرو و رفتار الاستیک پرفکتو پلاستیک آن‌ها است.

جدول ۴: هزینه محاسباتی مثال‌های عددی

	معادلات مقیاس مزو	معادلات مقیاس بهینه‌شده	فرایند بهینه‌سازی	مقدار کاهش هزینه محاسباتی (درصد)
مثال اول	۴۰۶۶۸	۲۸۸۷۸	۵۴۲۲	۱۵/۶
مثال دوم	۷۳۶۹۸	۱۷۰۱۸	۹۸۲۶	۶۳/۶
مثال سوم	۷۴۴۰۰	۲۰۸۹۸	۹۹۲۰	۵۸/۶



شکل ۱۳. مقایسه نمودارهای نیرو-جابه‌جایی مثال‌های عددی در مدل‌های مزو و بهینه‌شده

همان‌طور که ذکر شد تعداد معادلات مورد محاسبه با هزینه محاسباتی رابطه مستقیم دارد. در مدل مزو مثال اول تعداد ۴۰۶۶۸ معادله موردمحاسبه قرار گرفت. برای فرایند بهینه‌سازی درمجموع ۵۴۲۲ معادله و مدل بهینه‌شده ۲۸۸۷۸ معادله محاسبه شد؛ که کاهش ۱۵/۶ درصدی حجم محاسبات مقیاس بهینه‌شده نسبت به مقیاس مزو را در این مثال نشان‌می‌دهد. برای مثال دوم در مدل مقیاس مزو ۷۳۶۹۸ معادله، فرایند بهینه‌سازی ۹۸۲۶ معادله و مدل بهینه‌شده ۱۷۰۱۸ معادله محاسبه شد؛ که کاهش ۶۳/۵ درصدی را در مدل بهینه‌شده نسبت به مدل مزو نشان‌می‌دهد؛ و درنهایت در مدل مزو مثال سوم تعداد ۷۴۴۰۰ معادله موردمحاسبه قرار گرفت. برای فرایند بهینه‌سازی ۹۹۲۰ معادله و مدل بهینه‌شده ۲۰۸۹۸ معادله محاسبه شد و هزینه محاسباتی به میزان ۵۸/۶ درصد نسبت به مقیاس مزو کاهش پیدا کرد. در جدول (۴) تعداد معادلات مراحل مختلف و مقدار درصد کاهش هزینه محاسباتی در هر مثال نمایش داده‌شده‌است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی با استفاده از ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی و معیار تسلیم دراگر-پراگر برای کاهش حجم محاسبات تحلیل سازه‌های بنایی در مقیاس مزو ارائه شد. در روش پیشنهادی ابتدا مدل‌های عددی در مقیاس ماکرو با رفتار دراگر-پراگر به‌صورت عددی مدل شده و در ادامه در چند گام متوالی تحت تحلیل بهینه‌سازی توپولوژی با هدف بیشینه سختی و محدودیت توزیع ماده قرار گرفتند. در انتهای هر گام نتایج تنش و کرنش المان‌ها ذخیره شده و به‌عنوان ورودی در گام بعد مورداستفاده قرار گرفتند. این رویکرد باعث شده که در فرایند بیشینه‌سازی سختی، طراحی بهینه توانایی شناسایی مناطقی که بر اثر کرنش پلاستیک آسیب‌دیده‌اند را نیز داشته‌باشد. در ادامه، نواحی شناسایی شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت تجمعی ذخیره شده و نواحی مستعد آسیب را در مدل سازه بنایی شکل دادند. درنهایت با تشکیل مدل بهینه‌شده، نواحی شناسایی‌شده از الگوریتم بهینه‌سازی در مقیاس مزو و سایر نواحی در مقیاس ماکرو مدل‌سازی شدند. در مدل بهینه‌شده تعداد المان‌های مقیاس مزو کاهش یافت و جای خود را به المان‌های ماکرو دادند؛ لذا هزینه محاسباتی به مقدار قابل‌توجهی کاهش پیدا کرد. در ادامه روش ارائه‌شده توسط چهار مثال عددی با شرایط مرزی مختلف تایید و بررسی شد. مشاهده شد که الگوریتم به‌درستی نواحی مستعد آسیب را شناسایی نموده و مدل‌های مقیاس بهینه تطابق مناسبی از نظر رفتار و الگوی ترک‌خوردگی در مقایسه با نمونه‌های در مقیاس مزو نشان می‌دهند. در مدل‌های مطالعه شده هزینه محاسباتی به‌شکل مؤثری کاهش پیدا کرد به‌صورتی که در مدل اعتبار سنجی ۲۱/۳ درصد، مدل عددی مثال اول ۱۵/۶ درصد، مدل عددی مثال دوم ۶۳/۶ درصد و مدل عددی مثال سوم ۵۸/۶ درصد کاهش هزینه محاسباتی در مقایسه با مدل‌های مقیاس مزو مشاهده شد.

۶. منابع و مراجع

۱. *Varum, H., Parisi, F., Tarque, N., & Silveira, D. (2021). Structural Characterization and Seismic Retrofitting of Adobe Constructions (Vol. 20). Springer.*

۲. *Bilgin, H., & Hysenlliu, M. (2020). Comparison of near and far-fault ground motion effects on low and mid-rise masonry buildings. Journal of Building Engineering, 30, 101248. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101248*

۳. *Latifi, R., & Rouhi, R. (2020). Seismic assessment and retrofitting of existing RC structures: Seismostruct and seismobuild implementation. Civil Engineering and Architecture, 8(2), 84–93. https://doi.org/10.13189/cea.2020.080206*

۴. *Shadlou, M., Ahmadi, E., & Kashani, M. M. (2020). Micromechanical modelling of mortar joints and brick-mortar interfaces in masonry Structures: A review of recent developments. Structures, 23, 831–844. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.12.017*

۵. *Gregori, A., Mercuri, M., Angiolilli, M., & Pathirage, M. (2022). Simulating defects in brick masonry panels subjected to compressive loads. Engineering Structures, 263. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114333*

۶. *Weber, M., Thoma, K., & Hofmann, J. (2021). Finite element analysis of masonry under a plane stress state. Engineering Structures, 226. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111214*

۷. *Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures, 25(3), 299–326. https://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4*

۸. *Zhao, X., Dong, Q., Chen, X., & Ni, F. (2021). Meso-cracking characteristics of rubberized cement-stabilized aggregate by discrete element method. Journal of Cleaner Production, 316. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128374*

۹. *Zeng, B., Li, Y., & Cruz Noguez, C. (2021). Modeling and parameter importance investigation for simulating in-plane and out-of-plane behaviors of un-reinforced masonry walls. Engineering Structures, 248. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113233*

۱۰. *Gregori, A., Castoro, C., Mercuri, M., & Angiolilli, M. (2021). Numerical modelling of the mechanical behaviour of rubbercrete. Computers and Structures, 242. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106393*

۱۱. *Gregori, A., Castoro, C., Mercuri, M., & Angiolilli, M. (2020). Modeling the Mechanical Response of Rubberised Concrete. In Advanced Structured Materials (Vol. 132, pp. 341–352). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50464-9_19*

۱۲. *Oukhlef, A., Latrache, N., Champmartin, S., & Maiss, M. (2023). Identification of the pore size distribution of a porous medium using oscillating Newtonian fluids. Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics, 460(5), 509. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128615*

۱۳. *Couto, R., Bento, R., & Gomes, R. C. (2020). Seismic performance and fragility curves of historical residential buildings in Lisbon downtown affected by settlements. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(11), 5281–5307. https://doi.org/10.1007/s10518-020-00906-z*

۱۴. *Prosperi, A., Korswagen, P. A., Korff, M., Schipper, R., & Rots, J. G. (2023). Empirical fragility and ROC curves for masonry buildings subjected to settlements. Journal of Building Engineering, ۶۸(February), ۱۰۶۰۹۴. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106094*

۱۵. *Korany, Y. (2003). Mechanics and Modeling of URM Structures. Proceedings of International Short Course on Architectural and Structural Design of Masonry, 1–28.*

۱۶. *Abdulla, K. F., Cunningham, L. S., & Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. Engineering Structures, 151, 349–365. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.021*

۱۷. *Peng, B., Wang, D., Zong, G., & Zhang, Y. (2018). Homogenization strategy for brick masonry walls under in-plane loading. Construction and Building Materials, 163, 656–667. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.133*

۱۸. *Luo, Y., & Kang, Z. (2012). Topology optimization of continuum structures with Drucker-Prager yield stress constraints. Computers and Structures, 90–91(1), 65–75. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.10.008*

۱۹. *Tomazevic, M. (1999). Earthquakes and Seismic Performance of Masonry Buildings (pp. 5–33). https://doi.org/10.1142/9781848160835_0002*

۲۰. *Christensen, P. W., & Klarbring, A. (2008). An introduction to structural optimization. Solid Mechanics and its Applications, 153, 1–220. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8666-3_1*

۲۱. *BENDSOE, M. P., & SIGMUND, O. (2003). Topology Optimization - Theory, Methods, and Applications.*

۲۲. *Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. Structural Optimization, 1(4), 193–202. https://doi.org/10.1007/BF01650949*

۲۳. *Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (1999). Material interpolation schemes in topology optimization. Archive of Applied Mechanics, 69(9–10), 635–654. https://doi.org/10.1007/s004190050248*

۲۴. *Querin, O. M., Steven, G. P., & Xie, Y. M. (1998). Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. Engineering Computations (Swansea, Wales), 15(8), 1031–1048. https://doi.org/10.1108/02644409810244129*

۲۵. *Martin Philip Bendsoe, & Noboru Kikuchi. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (Vol. 71).*

۲۶. *Yang, X. Y., Xie, Y. M., Steven, G. P., & Querin, O. M. (1999). Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization. AIAA Journal, 37, 1483–1488. https://doi.org/10.2514/3.14346*

۲۷. *Gangl, P. (2020). A multi-material topology optimization algorithm based on the topological derivative. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 366, 113090. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113090*

۲۸. *Liu, P., Shi, L., & Kang, Z. (2020). Multi-material structural topology optimization considering material interfacial stress constraints. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 363, 112887. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112887*

۲۹. *Huang, X., & Xie, Y. M. (2009). Bi-directional evolutionary topology optimization of continuum structures with one or multiple materials. Computational Mechanics, 43(3), 393–401. https://doi.org/10.1007/s00466-008-0312-0*

۳۰. *Banh, T. T., & Lee, D. (2018). Multi-material topology optimization design for continuum structures with crack patterns. Composite Structures, 186, 193–209. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.088*

۳۱. *Li, Y., Yuan, P. F., & Xie, Y. M. (2023). Topology optimization of structures composed of more than two materials with different tensile and compressive properties. Composite Structures. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116609*

۳۲. *Sanders, E. D., Aguiló, M. A., & Paulino, G. H. (2018). Multi-material continuum topology optimization with arbitrary volume and mass constraints. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 340, 798–823. https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.01.032*

۳۳. *Sanders, E. D., Pereira, A., & Paulino, G. H. (2021). Optimal and continuous multilattice embedding. Science Advances, 7(16). https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4838*

۳۴. *Wu, J., Sigmund, O., & Groen, J. P. (2021). Topology optimization of multi-scale structures: a review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 63(3), 1455–1480. https://doi.org/10.1007/s00158-021-02881-8*

۳۵. *Li, Q., Steven, G. P., & Xie, Y. M. (1999). On equivalence between stress criterion and stiffness criterion in evolutionary structural optimization. Structural Optimization, 18(1), 67–73. https://doi.org/10.1007/BF01210693*

۳۶. *McKeown, J. J. (1997). A note on the equivalence between maximum stiffness and maximum strength trusses. Engineering Optimization, 29(1–4), 443–456. https://doi.org/10.1080/03052159708941007*

۳۷. *Papadrakakis, M., Tsompanakis, Y., Hinton, E., & Sienz, J. (1996). Advanced solution methods in topology optimization and shape sensitivity analysis. Engineering Computations (Swansea, Wales), 13(5), 57–90. https://doi.org/10.1108/02644409610120696*

۳۸. *Eschenauer, H. A., & Olhoff, N. (2001). Topology optimization of continuum structures: A review. Applied Mechanics Reviews, 54(4), 331–390. https://doi.org/10.1115/1.1388075*

۳۹. *Munk, D. J., Vio, G. A., & Steven, G. P. (2015). Topology and shape optimization methods using evolutionary algorithms: a review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 52(3), 613–631. https://doi.org/10.1007/s00158-015-1261-9*

۴۰. *Drucker, D. C., & Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics, 10(2), 157–165.*

https://doi.org/10.1090/qam/48291

۴۱. Chen, W. F., & Han, D. J. (1988). Plasticity for Structural Engineers. Plasticity for Structural Engineers. J. Ross publishing. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3864-5

۴۲. Alfano, G., & Crisfield, M. A. (2001). Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: Mechanical and computational issues. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 50(7), 1701–1736. https://doi.org/10.1002/nme.93

۴۳. Park, K., & Paulino, G. H. (2011). Cohesive zone models: A critical review of traction-separation relationships across fracture surfaces. Applied Mechanics Reviews, 64(6). https://doi.org/10.1115/1.4023110

۴۴. Nguyen, V. P., Lian, H., Rabczuk, T., & Bordas, S. (2017). Modelling hydraulic fractures in porous media using flow cohesive interface elements. Engineering Geology, 225, 68–82. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.010

۴۵. computed tomography images based phase- field modeling of mesoscopic failure in concrete. (n.d.).

۴۶. Deformation controlled tests in masonry shear wallsRaijmakers, TMJ and Vermeltfoort, A. T. (1992). Deformation controlled tests in masonry shear walls. holandés), Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft, Países Bajos.

۴۷. Rahbar, E., Permanoon, A., & Akhaveissy, A. H. (2023). Numerical evaluation of Masonry-Infill Frames: Analysis of lateral strength and failure modes on meso scale. Structures. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.026

۴۸. Vandoren, B., De Proft, K., Simone, A., & Sluys, L. J. (2013). Mesoscopic modelling of masonry using weak and strong discontinuities. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 255, 167–182. https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.11.005

۴۹. Paquette, J., & Bruneau, M. (2003). Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry building with flexible diaphragm. Journal of structural engineering, 129(6), 708–716.

۵۰. Akhaveissy, A. H. (2013). Limit state strength of unreinforced masonry structures. Earthquake Spectra, 29(1), 1–31. https://doi.org/10.1193/1.4000097

۵۱. Paquette, J., & Bruneau, M. (2006). Pseudo-dynamic testing of unreinforced masonry building with flexible diaphragm and comparison with existing procedures. Construction and Building Materials, 20(4), 220–228. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.025

۵۲. Drougkas, A., Licciardello, L., Rots, J. G., & Esposito, R. (2020). In-plane seismic behaviour of retrofitted masonry walls subjected to subsidence-induced damage. Engineering Structures, 223(May), 111192. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111192

۵۳. Gagliardo, R., Godio, M., Portioli, F. P. A., & Landolfo, R. (2023). Seismic analysis of failure mechanisms in adjacent interacting stone masonry buildings via rigid block modeling. Bulletin of Earthquake Engineering, (0123456789). https://doi.org/10.1007/s10518-023-01659-1