

تعیین مدول الاستیسیته دیوارهای پرکننده از مصالح رایج در ایران جهت استفاده در کارهای مهندسی

آزاده نوری فرد (نویسنده مسئول)، دانش‌آموخته دکتری معماری دانشگاه علم و صنعت ایران، anoorifard@iust.ac.ir

محمدرضا تابش پور، استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده: از آنجا که در اغلب ساخت‌وسازهای رایج، دیوار به سازه متصل می‌شود، لذا ضروری است برای جلوگیری از آثار نامطلوب دیوارها، پس از تحلیل و طراحی سازه، دیوارها به مدل اضافه و سازه کنترل شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی دیوارها انتخاب مدول الاستیسیته نزدیک به واقعیت می‌باشد. با توجه به اینکه در اکثر منابع آجر فشاری و یا مصالح غیر متداول در ایران مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفته است، در این مقاله سعی شده نخست از طریق مطالعات آماری بر روی ۶۲۵ ساختمان در حال ساخت، مصالح رایج در ساخت دیوارها در ایران شناسایی و سپس تمامی عوامل تأثیرگذار بر مدول الاستیسیته دیوارها بر اساس استانداردها و نتایج ۱۲ آزمون آزمایشگاهی و ارتعاشات محیطی که توسط سایر محققین انجام شده است، مورد بررسی قرار گیرد. نتایج محاسبات برای مدول الاستیسیته معادل دیوار در سه رده ضعیف، متوسط و قوی و با دو نوع جزئیات یک سطح اندود شده یا دو سطح اندود شده به ترتیب به میزان ۲۷۳۰، ۳۰۹۴، ۳۴۶۵، ۳۹۲۷، ۴۲۰۰ و ۴۷۶۰ مگاپاسکال و ضخامت معادل دیوار نیز بر حسب مقاومت و ضخامت دیوار، مقاومت و ضخامت اندود از ۸ تا ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات حاضر برای کنترل طرح سازه ساختمان‌های با اهمیت متوسط از دقت مطلوبی برخوردار است، لکن در خصوص ساختمان‌های با اهمیت زیاد و بسیار زیاد و همچنین پروژه‌های مقاوم‌سازی لازم است بررسی دقیق‌تری روی مصالح و جزئیات اجرایی دیوارها صورت گیرد.

واژگان کلیدی: مدول الاستیسیته، دیوار پرکننده، بلوک سفال، بلوک سیمانی سبک، کنترل سازه.

۱- مقدمه

با واقعیت داشته باشد. در صورت انتخاب مقادیری فراتر از واقعیت، طراحی سازه غیر اقتصادی خواهد بود و در صورت انتخاب مقادیری کمتر از واقعیت، عملاً کنترل‌های انجام شده بی‌فایده بوده و در زمان زلزله سازه دچار آسیب خواهد شد. علی‌رغم مقالات و منابع گسترده‌ای که در حوزه دیوارهای پرکننده تدوین گردیده است لکن در اکثر موارد آجر فشاری و یا مصالح غیر بومی مبنای آزمایش‌ها و تحلیل‌ها قرار گرفته است. در این مقاله سعی شده نخست

آثار نامطلوب دیوارهای پرکننده بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها مانند پیچش، طبقه نرم، ستون کوتاه، برهم‌کنش موضوعی است که امروزه توسط اکثر مهندسين شناخته شده است. انجام کنترل‌هایی در مرحله طراحی سازه مانع از آسیب دیدن سازه در زمان زلزله خواهد شد. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی دیوارهای پرکننده، مدول الاستیسیته دیوارها بر اساس مصالح مورد استفاده می‌باشد. انتخاب نامناسب این پارامتر موجب می‌شود کنترل‌های صورت گرفته فاصله زیادی



بلوک سفال



بلوک سیمانی سبک



ترکیب بلوک سفال و بلوک سیمانی سبک



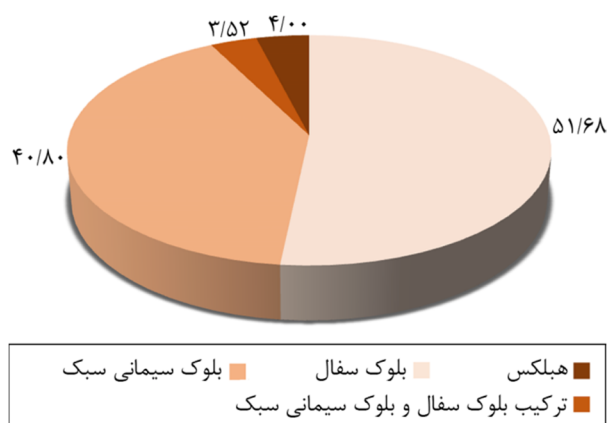
هبلکس

شکل (۲): مصالح رایج در اجرای دیوارها در ساختوسازهای رایج تهران.

مصالح مورد استفاده در ساختوسازهای رایج در ایران از طریق مطالعات آماری شناسایی و سپس همه عوامل تأثیرگذار بر مدول الاستیسیته دیوارها مورد بررسی قرار گیرد و در نهایت مدول الاستیسیته و ضخامت معادل دیوارها با توجه به مصالح و جزئیات اجرایی مرسوم در ساختوسازها برای کنترل‌های مهندسی محاسبه شود.

۲- مطالعه آماری مصالح مورد استفاده در اجرای دیوارها در شهر تهران

به منظور شناسایی مصالح رایج در اجرای دیوارها در ایران، یک مطالعه آماری در بازه زمانی یک‌ساله از شهریور ماه سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴ بر روی ۶۲۵ ساختمان در حال ساخت در نقاط مختلف شهر تهران انجام شده است. بر این اساس تمام نمونه‌های برداشت شده در چهار گروه اصلی شامل بلوک سفال، بلوک لیکا، ترکیب بلوک سفال و لیکا به صورت بلوک لیکا برای دیوارهای پیرامونی جهت تأمین مقاومت حرارتی و بلوک سفال برای دیوارهای داخلی و در نهایت بلوک‌های بتن سبک هبلکس قابل تقسیم‌بندی می‌باشد [۱]. فراوانی نمونه‌های برداشت شده به صورت نمودار درصدی در شکل (۱) و تصاویر نمونه‌ها در شکل (۲) ارائه شده است. بر این اساس ۵۱/۶۸٪ از دیوارها با استفاده از بلوک‌های سفالی و ۴۰/۸۰٪ با استفاده از بلوک‌های سیمانی سبک ساخته می‌شود.



شکل (۱): نمودار توزیع فراوانی، مصالح به کار رفته در اجرای دیوارها در شهر تهران.

جدول (۲): رده‌های مقاومتی بلوک‌های سیمانی سبک بر اساس استاندارد ۷۷۸۲ ایران [۴].

رده مقاومت فشاری	حداقل مقاومت فشاری (MPa)	
	میانگین نتایج سه آزمون	نتیجه هر آزمون منفرد
CS2	۲/۵	۲/۰
CS4	۵/۰	۴/۰
CS6	۷/۵	۶/۰
CS8	۱۰/۰	۸/۰

۴- تعیین مدول الاستیسیته دیوار

یک نکته مهم در خصوص مدول الاستیسیته مصالح بنایی، پراکندگی مقادیر حاصل از روابط ارائه شده توسط محققان مختلف می‌باشد که این امر به ماهیت رفتار مصالح بنایی مربوط است [۵]. لکن در همه روابط، مدول الاستیسیته به صورت ضربی از مقاومت فشاری دیوار بنایی می‌باشد. در FEMA 306، FEMA 274، FEMA 356 و استاندارد IS 1893 هند ۵۵۰ برابر مقاومت فشاری دیوار پیشنهاد شده است [۶-۹]. در استاندارد نیوزلند ۵۰۰ برابر جذر مقاومت فشاری دیوار بنایی پیشنهاد شده است [۱۰]. پاولی و پرستلی عدد ۷۵۰ برابر مقاومت فشاری دیوار بنایی را پیشنهاد داده‌اند و تابش پور ضمن بررسی روابط پیشنهاد شده توسط محققین قبلی، حد بالا جهت مطالعه آثار منفی را معادل ۸۰۰ برابر مقاومت فشاری و حد پایین را جهت مطالعه آثار مثبت، معادل ۶۰۰ برابر مقاومت فشاری پیشنهاد نموده است [۵]. در استاندارد AS 3700-2011 استرالیا نیز رویکرد مشابهی وجود دارد، لکن رابطه‌ها و جداولی جهت تعیین مقاومت فشاری دیوار بر اساس پارامترهای مختلف ارائه شده است که هماهنگی مطلوب‌تری با اهداف مطالعات حاضر دارد؛ ضمن اینکه نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی مصالح متداول در ایران تطبیق مناسبی با این استاندارد دارد. بر این اساس در ادامه مدول الاستیسیته دیوارها بر اساس دو گروه دیوارهای ساخته شده از بلوک‌های سفالی و بلوک‌های سیمانی سبک بر اساس مقاومت فشاری جداول فوق استخراج

لازم به ذکر است بسته به موقعیت جغرافیایی شهر، تمایل به این دو نوع مصالح متفاوت است، در نقاط شمالی شهر بیشتر تمایل به بلوک‌های سیمانی سبک بوده در حالی که در مناطق جنوبی، بلوک‌های سفالی بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است. بر این اساس به نظر می‌رسد حداکثر تغییری که تا چندین سال آتی در فرهنگ ساخت‌وسازهای متداول صورت خواهد گرفت، حرکت از سمت بلوک‌های سفالی به انواع بلوک‌های سیمانی سبک می‌باشد. بنابراین عمده تمرکز در این مقاله بر روی دو نوع مصالح بلوک سفالی و بلوک سیمانی سبک می‌باشد. در یک تقسیم‌بندی کلان این مصالح جزو بلوک‌ها هستند، برخلاف پانل‌ها که از یکپارچگی بیشتری برخوردارند در این گروه از مصالح کیفیت ملات و تأمین چسبندگی کافی بین قطعات در دستیابی به مقاومت مورد نیاز از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

۳- گروه‌بندی بلوک‌ها بر اساس مقاومت فشاری در استاندارد ملی ایران

بر اساس جدول ۶ استاندارد ۷۱۲۲ ایران [۳]، مربوط به آجرهای رسی سبک غیر باربر با سوراخ‌های افقی، سه رده مقاومتی برای بلوک سفال در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

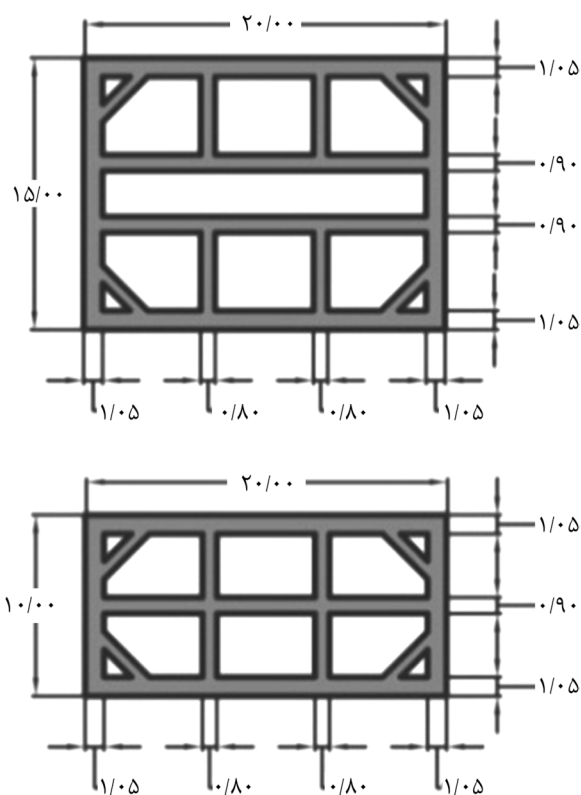
جدول (۱): رده‌های مقاومتی بلوک‌های سفالی بر اساس استاندارد ۷۱۲۲ ایران [۳].

رده مقاومت فشاری	حداقل مقاومت فشاری (MPa)	
	مقدار میانگین	کمترین مقدار منفرد
رده ۲	۲/۵	۲/۰
رده ۴	۵/۰	۴/۰
رده ۶	۷/۵	۶/۰

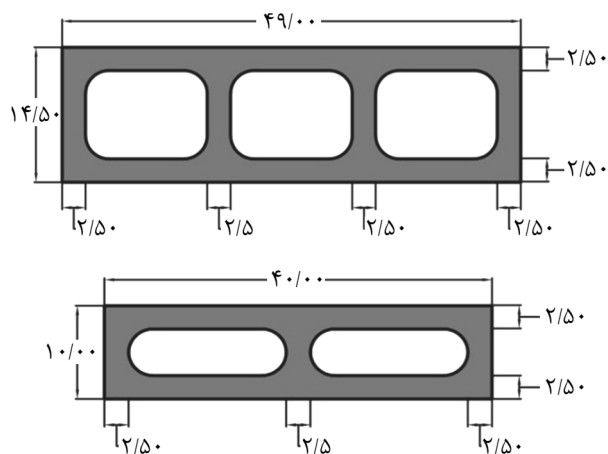
بر اساس جدول ۵ استاندارد ۷۷۸۲ ایران [۴]، مربوط به بلوک‌های سیمانی سبک غیر باربر، چهار رده مقاومتی برای بلوک سیمانی سبک در نظر گرفته شده است (جدول ۲).

۵- تعیین ضریب مجوفی

بر اساس مطالعات میدانی صورت گرفته در سطح شهر تهران، دیوارهای خارجی با استفاده از بلوک‌های ۱۵ سانتی متری و دیوارهای داخلی با استفاده از بلوک‌های ۱۰ سانتی متری اجرا می‌شود. در شکل‌های (۳) و (۴) یک نمونه از مقاطع برداشت شده ارائه شده و ابعاد و ضریب مجوفی بلوک‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل (۳): ابعاد بلوک‌های سفالی.



شکل (۴): ابعاد بلوک‌های سیمانی سبک.

شده است. بر اساس جدول ۱-۱۱ استاندارد AS 3700-2011، ملات مورد استفاده در کارهای بنایی معمول از نوع M3 می‌باشد. ضخامت ملات ۱/۵ سانتی متر در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط (۱) و (۲) و جداول ۱-۳ و ۲-۳ در این استاندارد مقاومت فشاری دیوار از روی مقاومت فشاری بلوک محاسبه شده است. برای استخراج مدول الاستیسیته بلوک سفالی و بلوک سیمانی سبک به ترتیب از روابط (۳) و (۴) مطابق با جدول ۳-۴ این استاندارد استفاده شده است [۱۱]. نتیجه محاسبات در جدول (۳) ارائه شده است.

$$f'_m = k_h f'_{mb} \quad (1)$$

$$f'_{mb} = k_m \sqrt{f'_{uc}} \quad (2)$$

که در آن:

f'_m : مقاومت فشاری دیوار، f'_{uc} : مقاومت فشاری واحد بنایی بر حسب مگا پاسکال، k_m : فاکتوری برای استخراج مقاومت فشاری دیوار بر اساس جدول ۱-۳ استاندارد AS 3700-2011، k_h : فاکتوری که نشان‌دهنده اثر نسبت ارتفاع واحد بنایی به ضخامت ملات است، بر اساس جدول ۲-۳ استاندارد AS 3700-2011

برای بلوک سفال:

$$E = 700 f'_m \quad (3)$$

برای بلوک سیمانی سبک:

$$E = 750 f'_m \quad (4)$$

جدول (۳): نتیجه محاسبات مربوط به مدول الاستیسیته بلوک سفالی و بلوک سیمانی سبک بر حسب MPa

بلوک	f'_{uc}	k_m	f'_{mb}	k_h	f'	E
بلوک سفال	۲/۵	۱/۴	۲/۲	۱/۲	۲/۶	۱۸۴۸
	۵	۱/۴	۳/۱	۱/۲	۳/۷	۲۶۰۴
	۷/۵	۱/۴	۳/۸	۱/۲	۴/۶	۳۱۹۲
بلوک سیمانی سبک	۲/۵	۱/۶	۲/۵	۱/۲	۳/۱۰	۲۲۵۰
	۵	۱/۶	۳/۶	۱/۲	۴/۳	۳۲۴۰
	۷/۵	۱/۶	۴/۴	۱/۲	۵/۳	۳۹۶۰
	۱۰/۱۰	۱/۶	۵/۱	۱/۲	۶/۱	۴۵۹۰

جدول (۴): تعیین ضریب مجوفی بلوک‌ها.

بلوک	ضخامت (سانتی‌متر)	مساحت ناخالص (سانتی‌متر مربع)	مساحت خالص (سانتی‌متر مربع)	ضریب مجوفی
بلوک	۱۰	۲۰۰	۹۴	۰/۴۷
سفال	۱۵	۳۰۰	۱۲۳	۰/۴۱
بلوک سیمانی	۱۰	۴۰۰	۲۴۸	۰/۶۲
سیک	۱۵	۷۱۰	۳۵۶	۰/۵

می‌شود [۱۷]. لازم است اشاره شود میزان مشارکت اندود بر مقاومت و ظرفیت باربری به عواملی همچون ضخامت و کیفیت اندود، ضخامت و کیفیت دیوار، سختی قاب و نسبت سختی قاب به دیوار بستگی دارد. به‌طور کلی تأثیر اندود بر روی دیوارهای نازک و با کیفیت ضعیف بیشتر است [۱۲]. با توجه به اینکه در خصوص مصالحی مانند بتن، آجر و مصالح مشابه مدول الاستیسیته اولیه معمولاً متناسب با مقاومت فشاری نهایی می‌باشد [۱۵]، لذا نتایج تحقیقات قبلی که عمدتاً میزان افزایش مقاومت فشاری در اثر اندود را مورد بررسی قرار داده‌اند در خصوص اثر اندود بر مدول الاستیسیته دیوار نیز قابل تعمیم می‌باشد.

در ادامه، نتایج تحقیقات انجام شده توسط محققین بر روی میزان تأثیر اندود بر سختی و مقاومت دیوار پرکننده ارائه شده است. جدول (۵) دربرگیرنده تحقیقاتی است که به‌صورت آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر اندود و یا آثار روش‌های مقاوم‌سازی پرداخته‌اند.

۶- تأثیر اندود بر سختی و مقاومت دیوار پرکننده

اندود اجزای دیوار را به هم متصل کرده [۱۲]، رفتار دیوار پرکننده را بهبود بخشیده [۱۳-۱۴]، موجب افزایش ظرفیت باربری دیوار [۱۲-۱۳، ۱۵-۱۸]، افزایش سختی [۱۳، ۱۹-۲۰] و افزایش شکل‌پذیری می‌شود [۱۲-۱۳، ۱۸]. اندود نواحی ترک‌خورده را کاهش می‌دهد [۱۲] و موجب می‌شود مکانیسم دستک قطری بیشتر از مود شکست لغزشی تشکیل شود [۱۸]. به‌علاوه، افزایش ممان اینرسی دیوار در اثر ضخامت اندود نیز موجب افزایش سختی

جدول (۵): نتایج آزمایش‌های انجام شده در خصوص میزان تأثیر اندود بر سختی و مقاومت دیوار پرکننده [۱۲-۱۳، ۱۵-۱۸، ۲۱].

محقق	سال	آجر / بلوک	تأثیر دیوار بر مقاومت قاب خالی	نوع اندود	مقاومت اندود (MPa)	تأثیر اندود بر مقاومت قاب پر شده	تأثیر اندود بر سختی قاب پر شده
شاه‌نظری	۱۳۷۶	بلوک سیمانی	٪۴۶۵	یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود گچ یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود سیمان	۷/۴ ۷/۵	٪۵۸	-
شاه‌نظری	۱۳۷۶	بلوک سفال	٪۱۵۵	یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود گچ یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود سیمان	۷/۴ ۷/۵	٪۲۰۳	-
شاه‌نظری	۱۳۷۶	آجر سفال	٪۶۴۵	یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود گچ یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود سیمان	۷/۴ ۷/۵	٪۱۸	-
شاه‌نظری	۱۳۷۶	آجر فشاری	٪۳۶۸	یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود گچ یک طرف ۱۰ میلی‌متر اندود سیمان	۷/۴ ۷/۵	٪۱۹۷	-
باران، سویل	۲۰۱۰	بلوک سفال	۳/۴۶	دو طرف اندود ماسه سیمان آهک	۳/۵، ۶/۵	۱/۶	۱/۸-۲/۵
مرجانی، ارسوی	۲۰۰۲	بلوک سفال	٪۲۴۰	-	-	٪۲۵	٪۵۰-٪۸۰
ریلدوا و همکاران	۲۰۱۲	آجر سفال	-	سیمان	۱۴/۲۷	٪۳۵	-
اوکویوکو و همکاران	۲۰۰۹	بلوک سفال	-	۱۰ میلی‌متر اندود ماسه سیمان آهک در هر طرف	۳/۵	۳/۱	-
اوکویوکو و همکاران	۲۰۰۹	بلوک سفال	-	۶ میلی‌متر اندود ماسه سیمان آهک در هر طرف	۱۰	۱/۳	-
تومیالان و همکاران	۲۰۰۰	بلوک سفال	-	۲۵ میلی‌متر اندود ماسه سیمان	-	٪۲۵	-
بالونویچ و همکاران	۲۰۱۶	بلوک سیمانی سیک	-	۱۰ میلی‌متر اندود در هر طرف	۳/۰	٪۳۵	-

جدول (۶): نتایج آزمایش‌های ارتعاشات محیطی در خصوص میزان تأثیر اندود بر پیوند قاب پر شده [۱۹-۲۰، ۲۲-۲۴].

محقق	سال	میزان کاهش پیوند قاب پر شده به قاب خالی	نسبت افزایش سختی قاب پر شده به قاب خالی	میزان کاهش پیوند قاب پر شده با اندود به قاب پر شده فاقد اندود	نسبت افزایش سختی قاب پر شده با اندود قاب پر شده فاقد اندود
کاپلان و همکاران	۲۰۱۵ a,b	۱۲/۲-۱۴/۶٪	۱/۳-۱/۳۶	۱۱/۲-۱۲/۹٪	۱/۲۶-۱/۳۲
ارسلان و دورموس	۲۰۱۴	۲۸-۷۳٪	۱/۹-۱۴/۲	۲-۱۸٪	۱/۰۴-۱/۴۸
گولر و همکاران	۲۰۰۸	۶-۹٪	۱/۱۳-۱/۲	۲۰-۳۵٪	۱/۵۷-۲/۴
بایک و همکاران	۲۰۱۱	-	-	۲۵-۳۵٪	۱/۷-۲/۵

۷-۱- محاسبه ضخامت معادل دیوار دارای اندود

رابطه (۵) برای محاسبه عرض مؤثر دیوار با اندود

بر اساس استاندارد NBC 201 نیال می‌باشد [۲۵].

$$t_{ei} = t_i \left(1 + \frac{t_p \times E_p}{t_i \times E_i} \right) \quad (۵)$$

که در آن:

t_{ei} : ضخامت مؤثر دیوار شامل اندود، t_i : ضخامت دیوار،
 E_i : مدول الاستیسیته دیوار، t_p : ضخامت اندود، و
 E_p : مدول الاستیسیته اندود

۷-۲- محاسبه مدول الاستیسیته معادل دیوار دارای اندود

روابط (۶) و (۷) برای محاسبه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دیوار دارای اندود پیشنهاد شده است [۲۶].

$$f_{in\ fill-90} = \frac{(f_i \times t_i + f_p \times t_p)}{t_i + t_p} \quad (۶)$$

$$E_{in\ fill-90} = \frac{(E_i \times t_i + E_p \times t_p)}{t_i + t_p} \quad (۷)$$

که در آن: t_i : ضخامت دیوار، E_i : مدول الاستیسیته دیوار،
 f_i : مقاومت فشاری دیوار، t_p : ضخامت اندود، E_p : مدول
الاستیسیته اندود، f_p : مقاومت فشاری اندود

۷-۳- محاسبه مدول الاستیسیته قطری دیوار

برای محاسبه مدول الاستیسیته قطری رابطه (۸) پیشنهاد شده است [۲۷].

وجود اندود، اثر قابل توجهی بر رفتار دیوار پرکننده دارد. بنابراین ویژگی‌های دینامیکی ساختمان با توجه به اینکه دیوارهای پرکننده دارای اندود و یا فاقد اندود هستند، متفاوت خواهد بود. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، پیوند سازه با دیوار پرکننده دارای اندود در مقایسه با سازه دارای دیوار پرکننده فاقد اندود کاهش می‌یابد که این امر به معنی افزایش سختی دیوار و در نتیجه سازه می‌باشد [۲۲]. جدول (۶) دربرگیرنده‌ی نتایج تأثیر اندودکاری دیوارهای پرکننده بر پیوند سازه از طریق مطالعات ارتعاشات محیطی بر روی ساختمان‌های واقعی و یا نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. از روی این میزان، نسبت افزایش سختی‌ها محاسبه شده است. مطابق با نتایج ارائه شده در جداول (۵) و (۶) تأثیر اندود بر مقاومت و سختی قاب پر شده در حدود ۱/۲-۳ می‌باشد، مطابق با نسبت سختی‌های ارائه شده در جدول (۶)، با فرض موازی بودن سختی قاب، دیوار و اندود، با حذف عدد ۱۴/۲ ردیف دوم، نسبت سختی دیوار پرکننده دارای اندود به دیوار پرکننده فاقد اندود عددی در حدود ۲-۹/۵ خواهد بود که این اثر ناشی از مجموع تأثیر اندود بر مدول الاستیسیته دیوار و افزایش ضخامت دیوار است. در تحقیقی گولر و همکاران [۲۰]، میزان افزایش مدول الاستیسیته دیوار در اثر اندود را معادل ۶۹٪ در نظر گرفته‌اند.

۷-۴- روابط مربوط به دیوار پرکننده‌ی دارای اندود

برای دیوار پرکننده‌ی دارای اندود، از دو طریق؛ محاسبه ضخامت معادل و مدول الاستیسیته معادل می‌توان مشخصات مقطع معادل را محاسبه نمود.

$$E_{in\ fill-\theta} = \frac{1}{\frac{1}{E_{in\ fill-0}} \cos^4 \theta + \left[-\frac{2\theta_{0-90}}{E_{in\ fill-0}} + \frac{1}{G} \right] \cos^2 \theta \times \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{in\ fill-90}} \sin^4 \theta} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸):

E_0 : مدول الاستیسیته قطری

E_0 : مدول الاستیسیته موازی بندها

E_{90} : مدول الاستیسیته عمود بر بندها

θ_{0-90} : ضریب پواسون: نسبت کرنش در جهت عمود بر بند

ناشی از کرنش در جهت موازی بند

G : مدول برشی

با تقریب مناسبی، مدول الاستیسیته موازی ملات را می‌توان معادل ۵۰٪ مدول الاستیسیته عمود بر ملات در نظر گرفت. برای دیوار پرکننده بتنی غیرمسلح، مدول الاستیسیته در امتداد قطری را می‌توان معادل ۷۵٪ مدول عمود بر ملات کاهش داد و بر حسب درصد مجوفی بلوک سفالی به‌طور متوسط میزان کاهش را حدود ۷۰٪ در نظر گرفت [۱۵].

۸- مدول الاستیسیته اندودها

در این بخش با توجه به ادبیات موضوع، مدول الاستیسیته اندود برای دو حالت اندود سیمان و اندود گچ تعیین می‌شود.

۸-۱- مدول الاستیسیته اندود سیمان

وزن مخصوص ملات ماسه سیمان بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان معادل ۲۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [۲۸]، در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، رابطه (۹) برای محاسبه مدول الاستیسیته بتن ارائه شده است [۲۹]. با فرض مقاومت فشاری اندود به میزان ۱۴-۳/۵ مگاپاسکال بر اساس اطلاعات جدول (۵)، مدول الاستیسیته اندود سیمان، ۱۶۸۰۰-۱۱۴۰۰ مگاپاسکال خواهد بود. با توجه به تفاوت نسبت‌های اختلاط ملات مورد استفاده در

کارهای بنایی با بتن سازه‌ای، مدول الاستیسیته اندود سیمان در مطالعات حاضر معادل ۱۲۰۰۰ مگاپاسکال فرض شده است.

$$E_c = (3300\sqrt{f_c} + 6900) \left(\frac{\gamma_c}{23} \right)^{1.5} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹):

E_c : مدول الاستیسیته برحسب مگاپاسکال

f_c : مقاومت فشاری مشخصه نمونه استوانه استاندارد بتن بر حسب مگاپاسکال

γ_c : جرم مخصوص بین ۱۵ تا ۲۵ کیلونیوتن بر مترمکعب

۸-۲- مدول الاستیسیته اندود گچ

در خصوص اندود گچ، فرمول‌ها و منحنی‌های متعددی جهت محاسبه مدول الاستیسیته گچ بر حسب ضریب تخلخل یا درجه حرارت محیط ارائه شده است. در مطالعات حاضر با استناد به اعداد ارائه شده در تحقیقات سایر محققین در خصوص گچ معمولی در دمای محیط که در جدول (۷) ارائه شده است، مقدار ۲۵۰۰ مگاپاسکال که در هر چهار تحقیق ارائه شده قابل استناد می‌باشد، انتخاب شده است.

جدول (۷): مدول الاستیسیته گچ بر اساس آزمایش‌های انجام شده [۳۰-۳۳].

مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	سال	محقق
۲۵۰۰-۱۷۰۰	۲۰۱۱	رحمانیان [۳۰]
۲۹۷۰-۱۶۲۰	۲۰۰۹	پلاچی و همکاران [۳۱]
۳۷۰۰	۲۰۰۹	ساناهوجا و همکاران [۳۲]
۵۳۰۰-۲۰۰۰	۱۹۹۴	کوکارد و همکاران [۳۳]

۹- محاسبه مدول الاستیسیته و ضخامت معادل

دیوارها برای سه رده مقاومتی

در مطالعات حاضر، با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که مقاومت فشاری بلوک سفالی مرسوم در ساخت و ساز معادل ۴۴ کیلوگرم بر سانتی متر مربع گزارش شده است [۲۱] و همچنین با استناد به اطلاعات سازندگان که مقاومت فشاری بلوک های سیمانی سبک شامل بلوک های لیکا، بلوک های پرلیتی، بلوک های لیپر و نمونه های مشابه بسته به ترکیبات و سطح مقطع معادل ۸۴-۲۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد [۳۴-۳۷]، از بازه ابتدایی و انتهایی رده های مقاومتی بلوک ها در جدول (۳) که از مصالح مرسوم فاصله قابل توجهی دارد، صرف نظر شده و بر این اساس سه رده مصالح ضعیف، متوسط و قوی تعیین و مبنای مطالعات قرار گرفته است (جدول ۸).

جزئیات رایج در اجرای دیوارها بر حسب دیوارهای داخلی و خارجی، ضخامت دیوار و نمای دو سمت در پنج حالت زیر قابل ارائه می باشد، دیوارهای یک طرف نما مربوط به دیوارهایی است که از یک ضلع در مجاورت پلاک همسایه قرار دارند، با توجه به اینکه نمای خارجی ساختمان اغلب خارج از ستون قرار دارد لذا در همه حالات شامل آجر نما، سنگ پلاک، پلاستر سیمان که جزو نماهای رایج می باشند تنها پلاستر یا دوغاب پشت نما منظور شده است.

۱. دیوار ۱۵ سانتی متری با یک طرف اندود سیمان و یک طرف اندود گچ

۲. دیوار ۱۵ سانتی متری با دو طرف اندود سیمان

۳. دیوار ۱۵ سانتی متری با یک طرف اندود سیمان

۴. دیوار ۱۵ سانتی متری با یک طرف اندود گچ

۵. دیوار ۱۰ سانتی متری با دو طرف اندود گچ

جهت تبدیل مدول الاستیسیته قائم به قطری برای بلوک ها ضریب ۷۰٪ استفاده شده است [۱۵]. مدول الاستیسیته دیوار در اثر اندود در دو طرف دیوار با ضریب ۱/۷ [۲۰] و در اثر اندود در یک طرف دیوار با ضریب ۱/۵ افزایش یافته است. با استفاده از رابطه (۵) و اعمال ضریب مجوفی دیوارها بر اساس بلوک های سیمانی از جدول (۴) ضخامت معادل دیوارها محاسبه شده است. در این محاسبات ضخامت اندود هر طرف ۳ سانتی متر می باشد. در خصوص اندود سیمانی سمت نما با توجه به اینکه در نمونه های مورد مطالعه نما از سنگ پلاک و دوغاب سیمان می باشد که به طور معمول خارج از ستون اجرا می شود لذا تنها نیمی از ضخامت سیمان در سختی دیوار پر کننده تأثیر داده شده و در خصوص نماهای سنگی داخل هم از تأثیر سنگ پلاک صرف نظر شده و تنها اثر اندود سیمان لحاظ گردیده است. مدول الاستیسیته اندود سیمان ۱۲۰۰۰ مگاپاسکال و اندود گچ ۲۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. نتیجه محاسبات در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۸): سه رده مقاومتی برای بلوک ها و مدول الاستیسیته معادل.

رده بندی مقاومتی بلوک ها	معادل رده بندی استانداردهای ۷۱۲۲ و ۷۷۸۲ ایران	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
ضعیف	رده ۴ بلوک سفال CS2 بلوک سیمانی سبک	۲۶۰۰
متوسط	رده ۶ بلوک سفال CS4 بلوک سیمانی سبک	۳۳۰۰
قوی	CS6 بلوک سیمانی سبک	۴۰۰۰

جدول (۹): نتیجه محاسبات مدول الاستیسیته قطری معادل و ضخامت معادل دیوار در سه رده مقاومتی با تأثیر اندود.

رده مقاومتی	مدول الاستیسیته قائم (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته قطری (مگاپاسکال)	ضریب افزایش در اثر اندود	مدول الاستیسیته معادل دیوار (مگاپاسکال)	ضخامت دیوار (سانتی متر)	ضخامت سیمان اندود (سانتی متر)	مدول الاستیسیته اندود سیمان (مگاپاسکال)	ضخامت گچ اندود گچ (سانتی متر)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	ضخامت معادل دیوار (سانتی متر)	افزایش سختی در اثر اندود
ضعیف	۲۶۰۰	۱۸۲۰	۱/۷	۳۰۹۴	۱۵	۱/۵	۱۲۰۰۰	۳	۲۵۰۰	۱۸	۴/۱۲
			۱/۷	۳۰۹۴	۱۵	۴/۵	۱۲۰۰۰	-	-	۲۵	۵/۶۶
			۱/۵	۲۷۳۰	۱۵	۳	۱۲۰۰۰	-	-	۲۱	۴/۱۴
			۱/۵	۲۷۳۰	۱۵	-	-	۳	۲۵۰۰	۱۰	۲/۰۵
			۱/۷	۳۰۹۴	۱۰	-	-	۶	۲۵۰۰	۱۰	۳/۳۵
متوسط	۳۳۰۰	۲۳۱۰	۱/۷	۳۹۲۷	۱۵	۱/۵	۱۲۰۰۰	۳	۲۵۰۰	۱۶	۳/۶۰
			۱/۷	۳۹۲۷	۱۵	۴/۵	۱۲۰۰۰	-	-	۲۱	۴/۸۲
			۱/۵	۳۴۶۵	۱۵	۳	۱۲۰۰۰	-	-	۱۸	۳/۵۸
			۱/۵	۳۴۶۵	۱۵	-	-	۳	۲۵۰۰	۱۰	۱/۹۳
			۱/۷	۳۹۲۷	۱۵	-	-	۶	۲۵۰۰	۹	۳/۰۰
قوی	۴۰۰۰	۲۸۰۰	۱/۷	۴۷۶۰	۱۵	۱/۵	۱۲۰۰۰	۳	۲۵۰۰	۱۴	۳/۲۷
			۱/۷	۴۷۶۰	۱۵	۴/۵	۱۲۰۰۰	-	-	۱۹	۴/۲۷
			۱/۵	۴۲۰۰	۱۵	۳	۱۲۰۰۰	-	-	۱۶	۳/۲۱
			۱/۵	۴۲۰۰	۱۵	-	-	۳	۲۵۰۰	۹	۱/۸۶
			۱/۷	۴۷۶۰	۱۰	-	-	۶	۲۵۰۰	۸	۲/۷۷

۱۰- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج این محاسبات برای کنترل طرح سازه ساختمان‌های با اهمیت متوسط یا در شرایطی که اطلاعات کافی از جزئیات اجرایی ساختمان‌های متداول برای محاسبات اولیه در اختیار نیست از دقت مطلوبی برخوردار است. در خصوص ساختمان‌های با اهمیت زیاد و بسیار زیاد و همچنین پروژه‌های مقاوم‌سازی لازم است بررسی دقیق‌تری روی مصالح و جزئیات اجرایی دیوارها صورت گیرد، لکن روش ارائه شده همچنان قابل استفاده خواهد بود.

مراجع

۱. نوری فرد، آ. (۱۳۹۶) ارائه مدلی برای جانمایی و تعیین مشخصات هندسی دیوارهای غیر سازه‌ای در مراحل پایانی طراحی پایه معماری جهت ارتقای رفتار لرزه‌ای ساختمان (مطالعه مسکن میان مرتبه متداول در شهر تهران). رساله دکتری در رشته معماری، اساتید راهنما: دکتر فاطمه مهدی زاده سراج؛ دکتر محمدرضا تابش پور، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت.

در این مقاله از طریق یک مطالعه آماری بر روی ۶۲۵ ساختمان در حال ساخت در سطح شهر تهران، بلوک سفالی و بلوک سیمانی سبک با فراوانی ۹۶٪ به عنوان پرکاربردترین مصالح مورد استفاده در اجرای دیوار ساختمان‌های متداول شناسایی و سپس از طریق مطالعه نتایج استانداردها و تحقیقات انجام شده بر روی خصوصیات دیوارها، مدول الاستیسیته و ضخامت معادل دیوارها در سه رده مقاومتی ضعیف، متوسط و قوی برای پنج نوع جزئیات رایج دیوارها بر اساس ضخامت دیوار، ضخامت، نوع و تعداد سطوح اندود شده در انواع دیوارهای خارجی و داخلی محاسبه شده است. نتایج محاسبات برای مدول الاستیسیته معادل دیوار در سه رده ضعیف، متوسط و قوی و با دو نوع جزئیات یک سطح اندود شده یا دو سطح اندود شده به ترتیب به میزان ۳۰۹۴، ۲۷۳۰، ۳۹۲۷، ۳۴۶۵ و ۴۲۰۰ و ۴۷۶۰ مگاپاسکال و ضخامت معادل دیوار نیز بر حسب مقاومت و ضخامت دیوار، مقاومت و ضخامت اندود از ۸ تا ۲۵ سانتی متر می‌باشد.

12. Baloević, G., Radnić, J., Grgić, N., and Matešan, D. (2016) The application of a reinforced plaster mortar for seismic strengthening of masonry structures. *Composites Part B: Engineering*, **93**, 190-202.
13. Marjani, F. and Ersoy, U. (2002) *Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading*. ECAS2002 International Symposium on Structural and Earthquake Engineering Middle East Technical University, Ankara.
14. Nasser, A.A. (2013) Effect of plastering on clay brick masonry behavior using Taguchi method. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, **1**, 174-179.
15. Baran, M. and Sevil, T. (2010) Analytical and experimental studies on infilled RC frames. *International Journal of the Physical Sciences*, **5**(13), 1981-1998.
16. Okuyucu, D., Sevil, T., and Canbay, E. (2009) Shear behavior of hollow brick infill wall panels strengthened by precast reinforced concrete panels and steel fiber reinforced plaster. *WCCE-ECCE-TCCE Joint Conference: Earthquake and Tsunami*, 1-9.
17. Tumialan, G., Tinazzi, D., Myers, J., and Nanni, A. (2000) Field evaluation of unreinforced masonry walls strengthened with FRP composites subjected to out-of-plane loading. 2000 Structures Congress, American Society of Civil Engineers, Philadelphia, Pennsylvania.
18. Rildova, D.K., Suarjana, M., and Pribadi, K.S. (2012) Experimental study on the behaviour of plastered confined masonry wall under lateral cyclic load. *15th World Conference on Earthquake Engineering* (15WCEE), Lisbon, Portugal.
19. Arslan, M.E. and Durmus, A. (2014) Modal parameter identification of in-filled RC frames with low strength concrete using ambient vibration. *Structural Engineering and Mechanics*, **50**(2), 137-149.
20. Guler, K., Yuksel, E., and Kocak, A. (2008) Estimation of the fundamental vibration period of existing RC buildings in Turkey utilizing
۲. نوری فرد، آ.، تابش پور، م.، و مهدی زاده سراج، ف. (۱۳۹۴) بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای پرکننده از مصالح رایج بر اساس نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای. پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، **۱۸**(۳)، ۱۳-۳۲.
۳. استاندارد ۷۱۲۲ ملی ایران (۱۳۸۲) مصالح ساختمانی- آجرهای رسی سبک غیر باربر با سوراخ‌های افقی و پنل‌های آجری رسی سبک غیر باربر با سوراخ‌های افقی- ویژگی‌ها، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول، تهران.
۴. استاندارد ۷۷۸۲ ملی ایران (۱۳۹۲) مصالح ساختمانی- بلوک‌های سیمانی سبک غیر باربر- ویژگی‌ها. سازمان ملی استاندارد ایران، تجدید نظر اول، تهران.
۵. تابش پور، م. (۱۳۹۲) قاب پرشده با دیوار آجری. دانشنامه زلزله ۷، نشر فدک ایساتیس.
6. FEMA 274 (1997) *Federal Emergency Management Agency*. Washington, D.C.
7. FEMA 306 (1998) *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Basic Procedures Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
8. FEMA 356 (2000) *Prestandard and commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
9. IS 1893 (Indian Standard) (2002) *Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, Part 1: General Provisions and Buildings*. Fifth Revision, Bureau of Indian Standard, New Delhi.
10. NZSEE (New Zealand Society for Earthquake Engineering) (2006) *Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes*. Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings, Wellington, New Zealand.
11. AS 3700-2011 (2015) *Australian Standard, Masonry Structures*. Fourth edition, Reissued Incorporating Amendment No.2. Incorporating amendment Nos1 and 2. Published by Standards Australia Limited, Sydney.

30. Rahmanian, I. (2011) *Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems*. Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering and Physical Sciences, the University of Manchester.
31. Plachy, T., Tesarek, P., Padevet, P., and Polak, M. (2009) Determination of Young's modulus of gypsum blocks using two different experimental methods. *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS '09)*, Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain, 109-113.
32. Sanahuja, J., Dormieux, L., Meille, S., Hellmich, C., and Fritsch, A. (2009) Micromechanical explanation of elasticity and strength of gypsum: from elongated anisotropic crystals to isotropic porous polycrystals. *Journal of Engineering Mechanics*, **136**(2), 239-253.
33. Coquard, P., Boistelle, R., Amathieu, L., and Barriac, P. (1994) Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster. *Journal of Materials Science*, **29**(17), 4611-4617.
34. URL 1: <http://leca.ir/?q=fa/blocks> (visited: 2/5/2016).
35. URL 2: <http://www.irperlite.ir/index.php/building-blocks-of-lightweight-and-super-lightweight-perlite.html> (visited: 2/5/2016).
36. URL 3: <http://www.khanehblock.com/> (visited: 2/5/2016).
37. URL 4: <http://www.liper.ir/index.php/goods/liper-block-featur> (visited: 2/5/2016).
- ambient vibration records. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**(S2), 140-150.
۲۱. شاهنظری، م. (۱۳۷۶) بررسی رفتار قاب‌های فولادی در برگیرنده دیوارهای بنایی تحت تأثیر بارهای جانبی در تراز سقف. رساله دکتری در رشته مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت.
22. Kaplan, O., Guney, Y., Doğangün, A., and Livaoğlu, R. (2015 b) Effect of infill walls and plaster for a four storey R/C building. *IOMAC'15, 6th International Operational Modal Analysis Conference*, Gijón- Spain.
23. Kaplan, O., Guney, Y., Doğangün, A., and Livaoğlu, R. (2015 a) The effect of infill walls on dynamic characteristics of a 4-storey RC building. *Global Civil Engineering & Applied Science Conference CEAASC*, Taiwan.
24. Bikce, M., Genes, M.C., Kacın, S., and Zubaroglu, A. (2011) Betonarme bir yapıda duvarsız ve duvarlı hallerin dinamik testleri. 1. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 11-14 Ekim, Ankara, Türkiye.
25. NBC 201 (Nepal National Building Code) (1994) *Mandatory Rules of Thumb Reinforced Concrete Buildings with Masonry Infill*. Babar Mahal, Kathmandu, Nepal, Ministry of Physical Planning and Works.
26. Binici, B. and Ozcebe, G. (2006) Seismic evaluation of infilled reinforced concrete frames strengthened with FRPS. *8th US National Conference on Earthquake Engineering* (p. 1717).
27. El-Dakhakhni, W.W., Elgaaly, M., and Hamid, A.A. (2003) Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames. *Journal of Structural Engineering*, **129**(2), 177-185.
۲۸. مقررات ملی ساختمان؛ مبحث ۶ (۱۳۹۲) بارهای وارد بر ساختمان. وزارت مسکن و شهرسازی، تهران.
۲۹. مقررات ملی ساختمان؛ مبحث ۹ (۱۳۹۲) طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران.