استفاده از ضایعات صنعتی برای تولید ارزان مصالح ساختمانی عایق

مهندس مجتبی مغربی[1]

چکیده

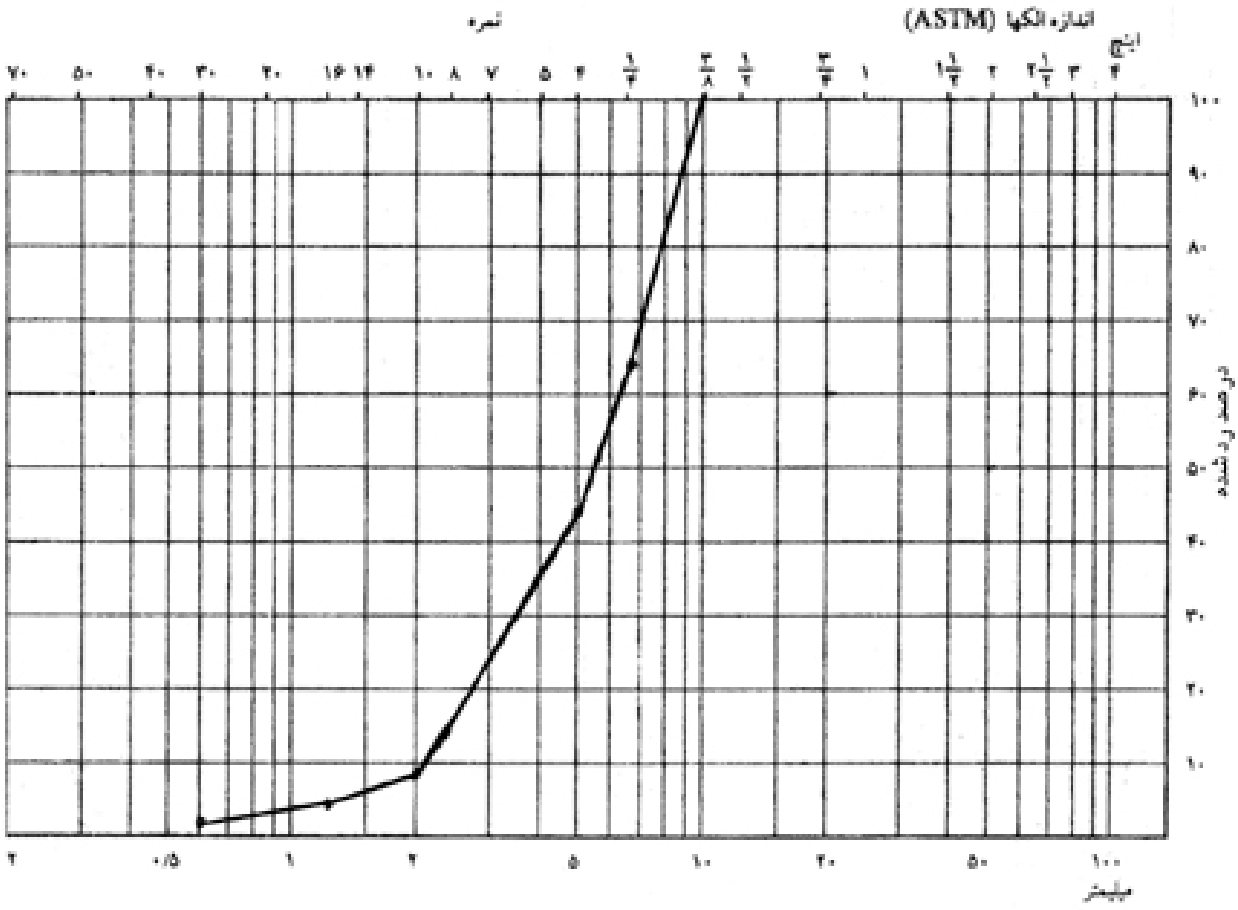
امروزه در صنعت ساختمان در کشور ما می‌توان از آجر به عنوان مصالحی غیر قابل انکار نام برد . سهولت اجرا ، سنتی بودن و کاربریهای متفاوت آن باعث محبوبیت آن شده است . اما از طرفی این مصالح نسبتاً سنگین با افزایش بار مرده ساختمان و افزایش مقاطع ستون‌ها و تیرها نه تنها تاثیری غیر اقتصادی خواهد داشت ، بلکه رفتار ضعیف این مصالح در برابر زلزله کارآیی این مصالح را زیر سئوال برده است . وهمچنین عملکرد ضعیف این نوع مصالح در برابر تبادل گرمایی و سرمایی در ساختمان قابل توجه می باشد .

در این مقاله به روشهایی برای تولید مصالح سبک، عایق، در عین حال ارزان تأکید شده است و نتایج کار بر روی یک ماده بازیافتی و دور ریختنی یک کارخانه قالب سازی به نام فوم آسیابی به عنوان جایگزینی برای مصالح سنگی در بتن مورد بررسی قرار می گیرد و با مقایسه کارآیی آن با هبلکس (تنها محصول شبیه در حال حاضر در بازار ایران) پرداخته و در انتها با شبیه‌سازی بارهای وارده از این محصول با نتایج ناشی از آجر برروی یک ساختمان واقعی این طرح را از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار خواهیم داد .

۱- مصالح جایگزین مصالح سنگی در بتن

در این تحقیق هدف اصلی پایین آوردن چگالی و در نتیجه وزن مصالح بوده است در این راستا با توجه به اینکه اکثر بتن از مصالح سنگی تشکیل شده است که در نتیجه بیشترین تاثیر را بر روی وزن بتن خواهد

[1]- مشهد ، بلوار ابوطالب ۲۸ پلاک ۱۸ کدپستی ۱۶۶۶۳ – ۹۱۹۶۶ تلفن : ۷۲۴۲۶۲۷ – ۰۵۱۱ mojtabamaghrebi@yahoo.com



نمودار ۱- نمودار دانه بندی فوم آسیابی

داشت به همین خاطر تصمیم به جایگزین کردن مصالحی سبک و ارزان (و در مرحله سوم دور ریختنی و بازیافتی) در بتن گرفته شد .

در ابتدا و پس از مدتها تحقیق ۱۸ نوع مصالح انتخاب شد که از این بین چیپس چوب و فوم آسیابی به مرحله آزمایش رسیدند، آزمایشات اولیه بررسی چیپس چوب (یکی از محصولات کارخانجات چوب بری و کارخانجات کاغذ سازی) به نتایج جالبی منتج شد که حتی در دسته بندی ACI قرار می‌گرفت و قابلیت این را دارد تا به عنوان عنصری سازه‌ای و باربر مورد استفاده قرار گیرد (تحقیق بر روی این مصالح ادامه دارد) ولی به خاطر خاصیت های ویژه فوم آسیابی و نزدیک تر بودن به نتایج مورد انتظار ما ، آزمایشات بر روی این نمونه صورت گرفت .

۲- فوم آسیابی :

فوم آسیابی یک محصول دور ریختنی یک کارخانه قالب سازی در مشهد است ، ماده‌ای بسیار سبک با وزن مخصوص $19/5\ kg/m^3$ و در حدود بیش از ۵۰۰ بار سبک‌تر از آب ، با درصد جذب آب پایین و

ماده‌ای نزدیک به اهداف تحقیق ، ماده ای با وزن مخصوص پایین که بتوان از آن به عنوان ماده‌ای سبک کننده در بتن استفاده کرد

از ویژگی‌های این ماده دارا بودن الزامات آیین نامه‌های ASTM C33-69 و BS-3797-1995 در مورد سبکدانه های درشت دانه می باشد . اما در مورد بدست آوردن چگالی این ماده و به خاطر خواص آن از آیین نامه BS استفاده شد ، چون در این آیین نامه از وارد کردن ضربه در هنگام بدست آوردن چگالی به ظرف آزمایش ممانعت به عمل آمده در صورتی که در ASTM توصیه می‌شود مصالح سبکدانه با چکش کوبیده شوند – نمودار دانه بندی این ماده بیشتر شبیه به شن می‌باشد تا ماسه که این خاصیت به ما کمک می‌کند تا به بتن هایی متخلخل تر و در نتیجه سبک تر برسیم .

شکل ۱ - فوم آسیابی

۳- سیمان

در مورد بتن های سبکدانه به خاطر اینکه اکثر مصالح سبک مقاومت چندان زیادی در برابر فشار و کشش ندارند درصد زیادی از تحمل فشار توسط سیمان صورت می‌پذیرد و در نتیجه بین مقاومت و سیمان رابطه‌ای مستقیم وجود دارد ، که مقاومت بالا مستلزم داشتن مقدار سیمان بیشتر می‌باشد. در این تحقیق برای نمونه های آزمایشاتی مقدار سیمان در یک بازه ۲۵۰ Kg/m^3 تا ۴۵۰ انتخاب شده است تا بتوان از مقایسه نتایج آزمایشها به مقدار سیمان بهینه در مقاومت مورد نظر رسید .

۴- نسبت آب

رفتار رئولوژی بتن سبکدانه تا اندازه ای با بتن معمولی متفاوت است و می‌توان گفت این خاصیت به خاطر وجود فضاهای خالی بیشتر در بتن سبکدانه می‌باشد، به علت خاصیت تراکم و انقباضی که بعد از مصرف مواد روان کننده در بتن بوجود می‌آید و در نتیجه باعث کاهش فضاهای خالی و در نهایت تراکم و کاهش تخلخل بتن می‌شود از روان کننده‌ها در آزمایشات استفاده نشد و فقط می‌توان آن را برای حالتی پیش بینی کرد که نیاز به پمپاژ مصالح باشد و خطر جذب آب توسط مصالح و در نتیجه کاهش روانی در هنگام عملیات پمپ وجود داشته باشد در این آزمایشات برای بدست آوردن مقدار آب بهینه از نسبت آب به سیمان ۰/۴ ، ۰/۵ ، ۰/۶ استفاده شده است و در عین حال کارآیی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت .

۵- میکروسیلس :

برای بالا بردن مقاومت فشاری و کششی نمونه ، افزایش دوام و پایداری بتن ، پایین آوردن نفوذ پذیری، افزایش مقاومت در برابر سایش ، بالا بردن مقاومت در برابر خوردگی در این آزمایشات از میکروسیلیس با وزن مخصوص در حدود ۲۵۰-۳۰۰ Kg/m^3 که ۹۰٪ آن از اکسید سیلسیم تشکیل شده است استفاده شد.

آیین نامه ASTM بیان می‌کند که میزان مصرف میکروسیلیس بستگی به این دارد که هدف آزمایش مقاومت است یا افزایش عمر که با توجه به تحقیقات و آزمایشات اولیه در کلیه نمونه میزان میکروسیلس ۷٪ وزنی سیمان اختیار شد .

۶- نحوه و درصد اختلاط

در اکثر آیین نامه ها ، دستور کار نسبت های اختلاط بتن‌های سبکدانه بر اساس نسبت حجمی سیمان با سبکدانه ها می‌باشد ولی به خاطر اینکه اهداف و خواص نمونه های مورد انتظار در هیچکدام از دسته بندی آیین نامه‌ها بویژه ACIجای نمی گرفت و با توجه به آزمایشات اولیه به فرمول مورد اختلاط زیر که در باطن حجمی می‌باشد رسیدیم .

$$A+B+C+D = 1 \ m^3$$

حجم سیمان (۲۵۰ - ۴۵۰ Kg/m^3) = A

حجم آب (۶ ٪ - ۴٪ وزن سیمان) = B

حجم میکروسیلس (۷٪ وزن سیمان مصرفی) = C

حجم فوم آسیابی (A+B+C) -1 = D

۷-نتایج آزمایشات :

از نتایج آزمایشات می‌توان به راحتی به رابطه بین مقاومت و میزان سیمان پی برد تقریباً در کلیه آزمایشات با افزایش مقدار سیمان ، مقاومت نیز افزایش یافته است .

– نسبت آب به سیمان بهینه را در کل نمونه‌ها می‌توان ۰/۶ فرض کرد چون با این درصد آب به سیمان نه تنها به بیشترین مقاومت رسیده است بلکه کارآیی آن نیز در حد خوب بوده و ازدیاد بیش از آب به این نمونه‌ها باعث خارج شدن سیمان از حالت خمیری و پیدا کردن حالت دوغاب می‌شود و به خاطر اینکه مصالح سبکدانه بسیار از آب سبکتر می‌باشند و جمع شدن کلیه مصالح سبکدانه بر روی آب همگنی نمونه را از بین می‌برد.

۸-مقایسه بین نمونه های فوم آسیابی با هبلکس

با مساعدت مسئولیت آزمایشگاه شرکت سپاد خراسان ، نتایج آزمایشات بر روی نمونه های هبلکس که برای پروژه الماس شرق صورت گرفته بود جهت مقایسه در اختیار قرار گرفت که در زیر به مقایسه بین ۲ محصول خواهیم پرداخت .

۱– بالاترین مقاومت فشاری هبلکس kg/cm^3 ۲۴ می‌باشد که در حالت اشباع به kg/cm^3 ۱۹ کاهش می‌یابد ولی نمونه فوم آسیابی در بالاترین حالت دارای مقاومت kg/cm^3 ۲۷/۷ می‌باشد که این در حالت اشباع به $kg/cm^3$۲۴ می‌رسد .

۲– جذب آب زیاد توسط هبلکس به خاطر وجود تخلخل بالا ، در حالت اشباع باعث افزایش ۷۰٪ چگالی آن می‌شود که نمونه‌های فوم آسیابی به خاطر آنکه بیشتر تخلخل نمونه‌ها به خاطر وجود فوم آسیابی می‌باشد در حالت اشباع در حدود ۲۵٪ افزایش چگالی پیدا می‌کند .

۳– نمونه‌های هبلکس دارای چگالی عادی ۰/۵۱ و در حالت اشباع ۰/۸۹ می‌باشند که نمونه های فوم آسیابی در حالت عادی دارای چگالی ۰/۷۶ می‌باشند که در حالت اشباع به ۰/۸۷ می‌رسد.

۴– هبلکس به خاطر تخلخل زیاد آن مقاومت آن در برابر سایش و ضربه بسیار کم است . ولی نمونه های فوم آسیابی به خاطر داشتن بافت بتنی حاوی میکروسیلیس دارای مقاومت خوبی هستند .

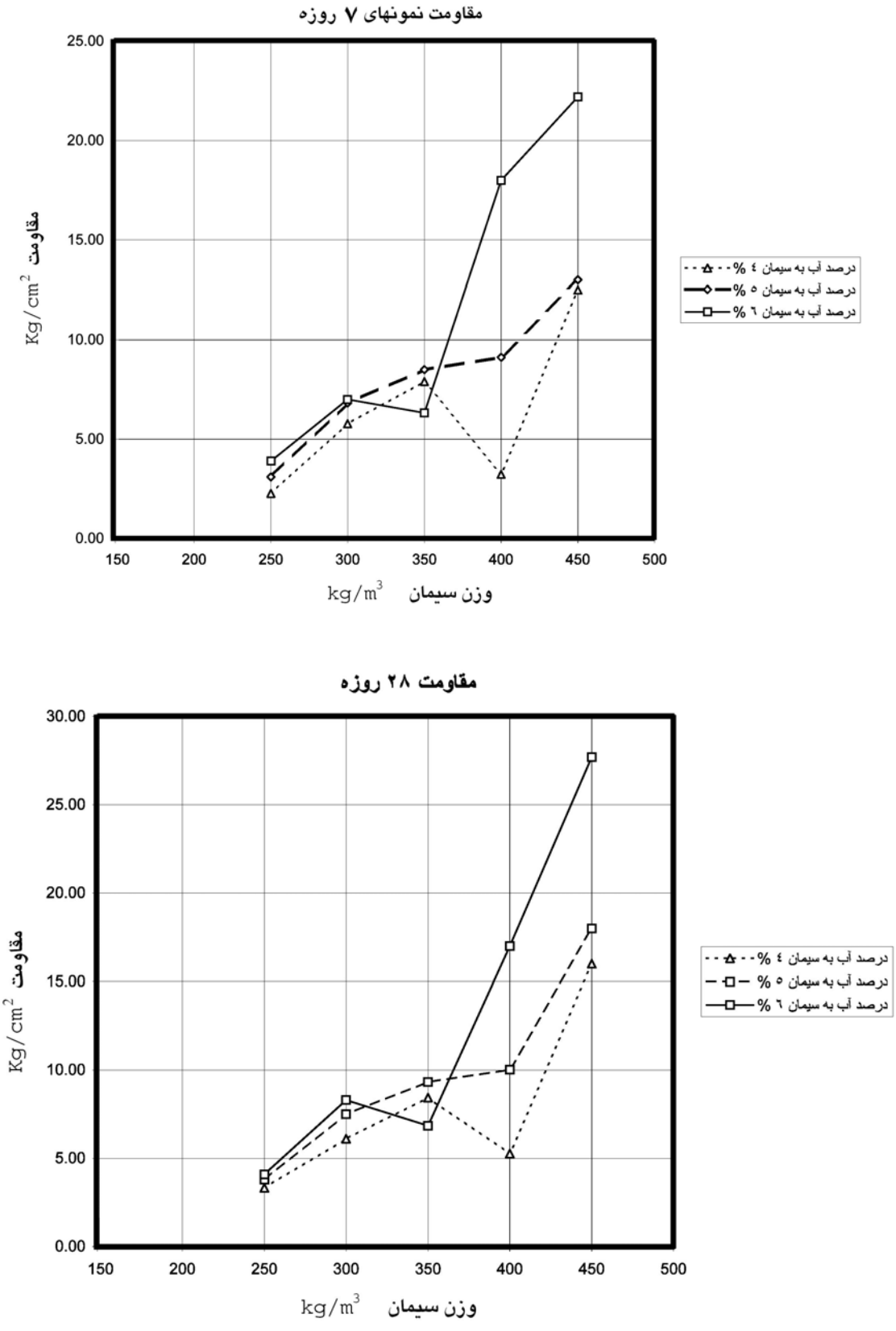
۵– هبلکس را تعدادی معدود کارخانه تولید می‌کنند و فرآیند تولید آن تخصصی است ولی این محصول را هر کس و در هر جا می‌تواند تولید کند .

۶– هبلکس در ابعاد و اندازه‌های محدود و برای کاربردهای خاص تولید می‌شود ولی این محصول را هر کس می‌تواند در هر ابعادی که نیاز داشت تولید کند .

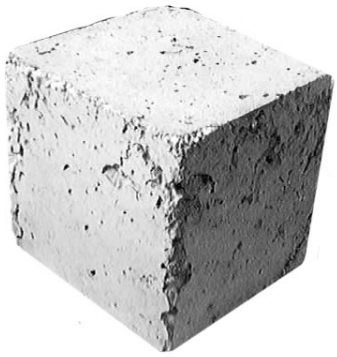
۷– این محصول قابل پمپ کردن و ریختن درجا و قالب بندی های بزرگ می‌باشد که هبلکس خاصیت پمپ برای آن در هیچ حالتی مفهوم ندارد .

ردیف	سیمان Kg/m^3	آب Kg/m^3	فوم آسیابی Kg/m^3	نسبت آب به سیمان W/C	میکروسیلیس Kg/m^3	چگالی Ton/m^3	کارایی	مقاومت ۷ روزه Kg/Cm^2	مقاومت ۲۸ روزه Kg/Cm^2
1	250	100	16.00	0.4	17.50	0.383	پایین	2.27	3.33
2	250	125	15.51	0.5	17.50	0.403	پایین	3.10	3.80
3	250	150	15.02	0.6	17.50	0.432	متوسط	3.90	4.10
4	300	120	15.30	0.4	21.00	0.456	پایین	5.78	6.11
5	300	150	14.71	0.5	21.00	0.485	پایین	6.82	7.50
6	300	180	14.13	0.6	21.00	0.515	متوسط	7.00	8.30
7	350	140	14.60	0.4	24.50	0.529	پایین	7.90	8.44
8	350	175	13.92	0.5	24.50	0.563	پایین	8.50	9.33
9	350	210	13.23	0.6	24.50	0.597	متوسط	6.32	6.85
10	400	160	13.90	0.4	28.00	0.601	پایین	3.23	5.26
11	400	200	13.12	0.5	28.00	0.641	پایین	9.12	10.02
12	400	240	12.34	0.6	28.00	0.68	متوسط	18.00	17.00
13	450	180	13.20	0.4	31.50	0.674	متوسط	12.50	16.00
14	450	225	12.32	0.5	31.50	0.718	متوسط	13.00	18.00
15	450	270	11.44	0.6	31.50	0.762	بالا	22.20	27.70

جدول ۱ – نحوه اختلاط



نمودار ۲ – نسبت مقاومت نمونه های ۷ روزه و ۲۸ روزه نسبت به سیمان مصرفی



شکل ۲- نمونه شماره ۱۲

شکل ۳ – نمونه شماره ۷

۸- در ابعاد هبلکس زایده‌های نر و ماده ای به خاطر مقاومت کم در برابر ضربه تعبیه نشده است که این خاصیت می‌تواند در این نمونه به خاطر داشتن مقاومت خوب تعریف شود .

در اینجا لازم به تذکر است که قصد ما از این مقایسه این نیست که مزایای مصالحی سبکی چون هبلکس را انکار کرده و خواص آن را زیر سئوال ببریم بلکه چون هبلکس تنها محصول حال بازار ایران است که از نظر رفتاری و کارآیی شبیه به نمونه های ساخته شده است این مقایسه صورت گرفت .

هدف اصلی این تحقیق ا ین است به محصولی دست یابیم که در عین حال که بسیاری از مشکلات فنی آجر را دارا نباشد، اقتصادی نیز باشد برای این منظور و مقایسه عملکرد بین آجر و بتن فوم آسیابی به صورت مجازی و شبیه سازی یک ساختمان واقعی را مورد بارگذاری ناشی از هر کدام از ۲ محصول قرار داده و نتایج را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم .

۹-شبیه سازی بارگذاری

۹-۱ مشخصات ساختمان شبیه سازی شده :

به علت اینکه اثر زلزله هم در محاسبات وارد شود ، بر اساس آیین نامه بایستی یک ساختمان بلندتر از ۴ طبقه انتخاب می‌شد به همین منظور یک ساختمان ۶ طبقه با اسکلت فلزی و با ۲۸۸ متر زیربنا در نظر گرفته شد و ۴ بار مورد تحلیل (استاتیکی و دینامیکی) قرار گرفت که تحلیل دینامیکی یا اثر زلزله این سازه بر اساس طرح طیف ایران صورت گرفت تا نتایج مستندتر و دقیقتر باشند .

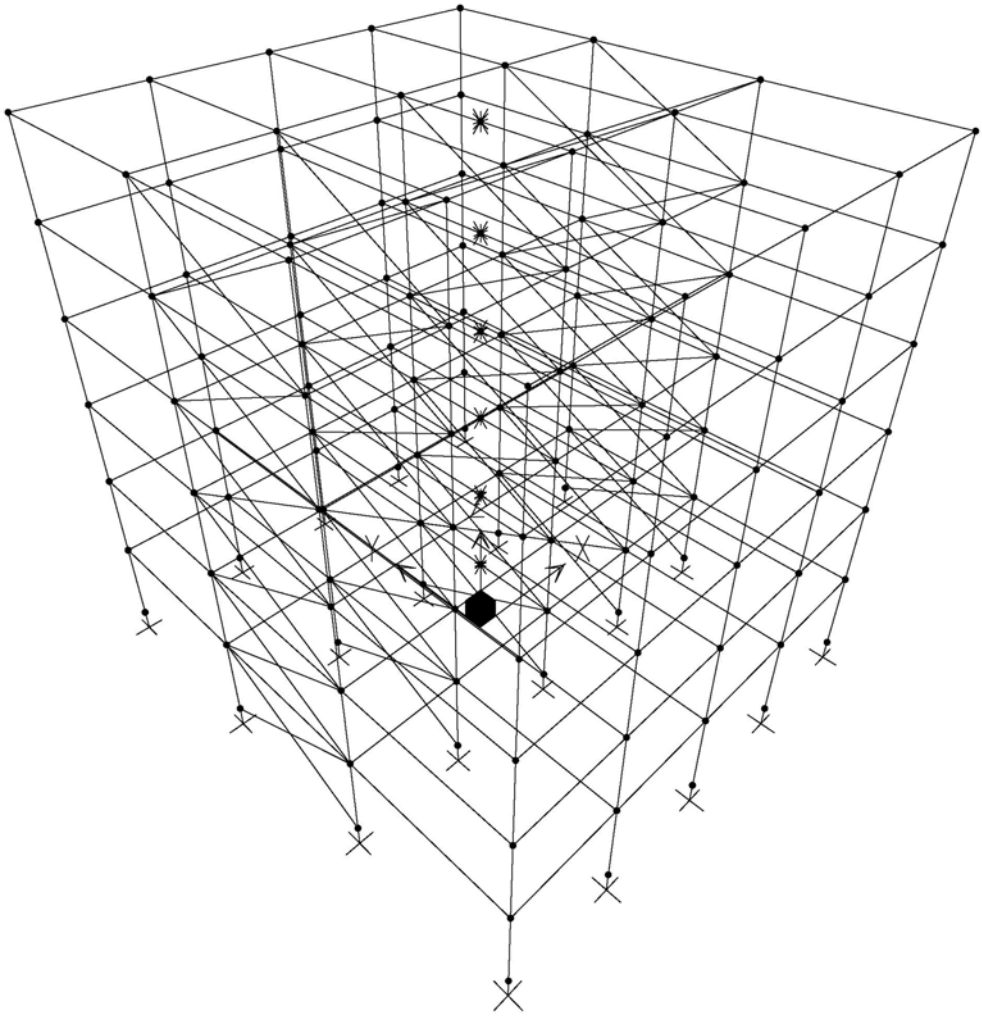
بر این اساس مدل فلزی در ۴ حالت مورد بارگذاری قرار گرفت که ۴ حالت عبارتند از :

مدل بارگذاری ۱-۱ : سقف از نوع تیرچه بلوک و دیوارهای داخلی از آجر

مدل بارگذاری۲-۱ : سقف از نوع تیرچه بلوک و دیوارها از بتن فوم آسیابی

مدل بارگذاری۱-۲ : سقف از نوع کامپوزیت و دیوارهای داخلی از آجر

مدل بارگذاری۲-۲ : سقف از نوع کامپوزیت و دیوارهای داخلی از بتن فوم آسیابی



شکل ۴ – ساختمان واقعی شبیه سازی شده تحت بارگذاری های مختلف

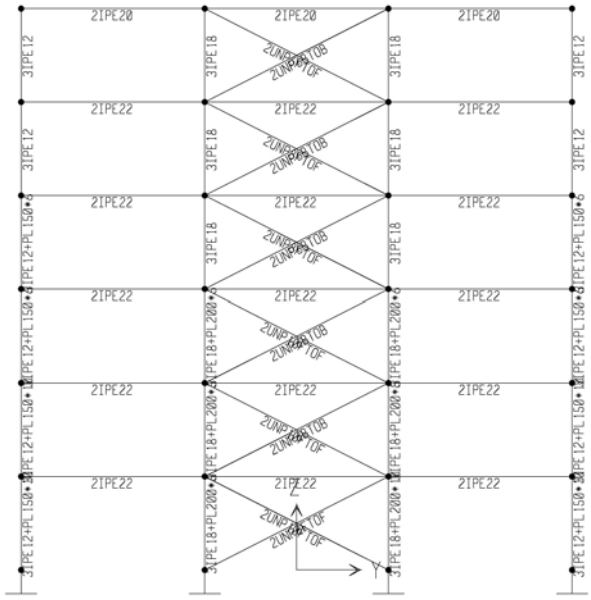
هر چند در بسیاری از پروژه‌ها از مصالح سبک (بویژه هبلکس) در دیوارهای خارجی بنا هم استفاده می‌کنند ولی ما در این شبیه سازی و برای بالا بردن ضرایب اطمینان که بخشی آن به خاطر اجرا می‌باشد کلیه دیوارهای خارجی را از آجر سفال ۲۰ با ملات ماسه سیمان استفاده کرده و بر این اساس بارگذاری نمودیم (گرچه این مصالح این قابلیت را نیز دارا می‌باشند)

۹-۲ مقایسه بین مدل بارگذاری۲-۱ با مدل بارگذاری ۱-۱

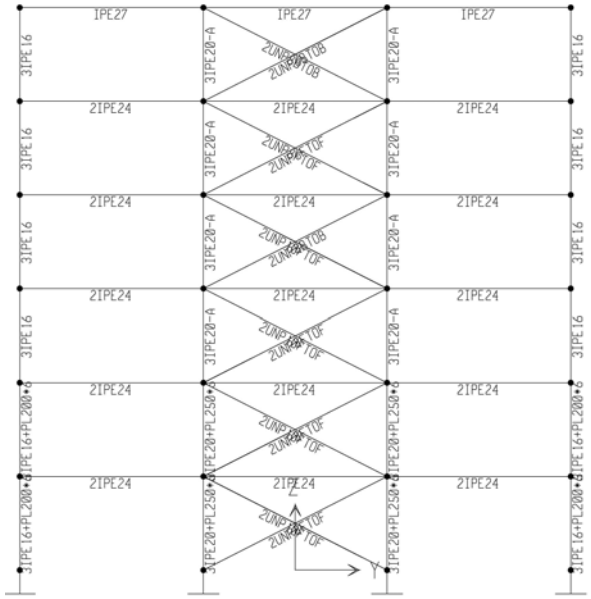
۱- بار مرده ساختمان در مدل بارگذاری۲-۱ نسبت به مدل بارگذاری ۱-۱ در هر متر مربع در حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد و ظرفیت بارگیری تیرهای میانی در حدود ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.

۲- ستون های کناری در مدل بارگذاری ۱-۱ از مقطع 3IPE16 می‌باشند که در مدل بارگذاری۲-۱ به مقطع 3IPE12 کاهش می‌یابد .

۳- ستون‌های متصل به بادبندها در مدل بارگذاری ۱-۱ از مقطع 3IPE20 می‌باشند که در مدل



شکل ۵ - مدل بارگذاری ۲-۱



شکل ۶ - مدل بارگذاری ۱-۱

بارگذاری۲-۱ به مقطع 3IPE18 کاهش می‌یابد .

۴- تیرهای در راستای بادبندها در مدل بارگذاری ۱-۱ از مقطع 2IPE24 هستند که مدل بارگذاری۲-۱ به مقطع 2IPE22 کاهش می‌یابد .

۹-۳ برآورد اقتصادی

فقط در هزینه ستون های این ساختمان در مدل بارگذاری۲-۱ ، ۶۵٪ صرفه‌جویی می‌شود و در کل قیمت اسکلت فلزی در حدود ۲۶٪ کاهش می‌یابد .

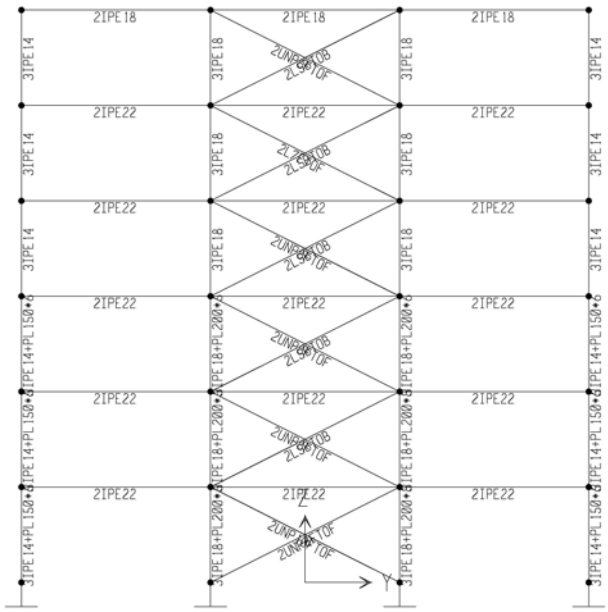
اما با توجه به اینکه مصالح با نمونه فوم آسیابی اگر با توجه به تمامی ضرایب ازدیاد قیمت گذاری شود، بهای آن در حدود ۴۵٪ گران تر از آجر بدست می‌آید .

اما اگر در کل تمامی این کاهش و افزایش قیمتها را اعمال کرد سازه مدل بارگذاری۲-۱ نسبت به مدل بارگذاری ۱-۱ در حدود ۲۴٪ کاهش قیمت داشته است .

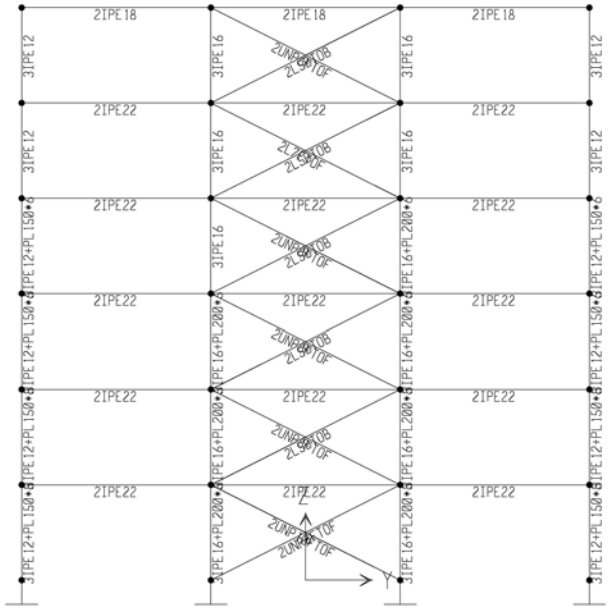
۹-۴ مقایسه مدل بارگذاری۲-۲ با مدل بارگذاری۱-۲

۱- بار مرده ساختمان در مدل بارگذاری۲-۲ نسبت به مدل بارگذاری۱-۲ در هر مترمربع ۱۶ درصد کاهش یافته است و ظرفیت بارگیری تیرهای میانی ۲۲ درصد کاهش می‌یابد .

۲- ستون های کناری در مدل بارگذاری۱-۲ از مقطع 3IPE14 می‌باشد که در مدل بارگذاری۲-۲ به 3IPE12کاهش می‌یابد .



شکل ۷ - مدل بارگذاری ۱-۲



شکل ۸ - مدل بارگذاری ۲-۲

۳- ستون های متصل به بادبندها در مدل بارگذاری۱-۲ از مقطع 3IPE18 می باشد که در مدل بارگذاری۲-۲ به 3IPE16کاهش می‌یابد .

۴- در مدل بارگذاری۱-۲ تیرهای عمود بر بادبندها از 2IPE22 هستند که در به 2IPE18 کاهش یافته است.

۹-۵ برآورد اقتصادی

فقط در هزینه ستون های ساختمان در مدل بارگذاری۲-۲ ، ۱۴٪ صرفه‌جویی اقتصادی شده است و در کل قیمت اسکلت فلزی در حدود ۲۵٪ کاهش بها داشته است. و با اعمال تمامی افزایش و کاهش قیمتها کل سازه در حدود ۱۳ درصد کاهش بها داشته است.

	ستونهای بیرونی	ستونهای متصل به بابندها	تیرهای متصل به بادبندها
مدل ۱-۱ سقف تیرچه بلوک و دیواهای داخلی از آجر	3IPE16	3IPE20	2IPE24
مدل ۲-۱ سقف تیرچه بلوک و دیواهای از بتن فوم آسیابی	3IPE12 +	3IPE18	2IPE22
مدل ۱-۲ سقف کامپوزیت و دیواهای داخلی از آجر	3IPE14	3IPE18	2IPE22
مدل ۲-۲ سقف کامپوزیت و دیواهای از بتن فوم آسیابی	3IPE12	3IPE16	2IPE18

جدول ۲- مقایسه مقاطع در موقعیت های یکسان تحت بارگذاری های مختلف

۱۰-نتایج :

- این مصالح در عین سبکی به علت حالت تخلخلی که در آن وجود دلرد عایق بسیار خوبی برای صدا و حرارت محسوب می‌شوند.
- کارآیی که ما از این عنصر سازه‌ای انتظار داریم آن است که به عنوان عنصری غیر باربر در سازه بتواند نقش دیوارها را ایفا کند و هیچگاه برای حالتی که دیوار تحت بارگذاری باشد طراحی نشده است .
- این عنصر جدید سازه‌ای در عین حال که از نظر فنی نسبت به آجر برتری دارد ، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است و می‌تواند نقش مهمی در کاهش قیمت تمام شده ساختمان داشته باشد .
- سبک تر بودن این مصالح نسبت به آجر (۲/۵ برابر سبکتر) در ساختمان باعث می‌شود در هنگام زلزله تلفات جانی ناشی از ضربه تخریب دیوارها و ماندن زیر آوار کاهش یابد .
- این مصالح به خاطر نداشتن عدم محدودیت خاصی می‌تواند به عنوان جایگزینی برای آجر در تمامی پروژه های سازه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد .

این طرح هم اکنون مراحل ثبت صنعتی را طی می کند

۱۱- منابع :

آیین نامه های :

- ACI 213R-87
- ASTM C 567-91
- ASTM C 29-91a
- ASTM C 332-87
- ASTM C 331-94
- ASTM C 330-89
- BS : 3797:1990
- BS : 3797:1970
- BS : 1047:1983