مقایسه میزان تخریب گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در زلزله منطقه قائنات ـ اردیبهشت ۱۳۷۶*

دکتر محمود گلابچی**

چکیده:

بررسی رفتار ساختمان‌های جدید الاحداث در زلزله منطقه قائنات نشان‌دهنده آن است که عامل اصلی فروریختن ساختمان‌های ساخته شده توسط مردم و یا نهادهای مردمی در هنگام وقوع زلزله عدم یکپارچگی بین دیوار و سقف و در نتیجه عدم تشکیل یک سیستم مقاوم سه بُعدی بوده است. عدم اجرای کلاف‌های افقی و قائم، علت اصلی این عدم یکپارچگی می‌باشد.

براساس نتایج این تحقیق، عوامل اصلی عدم مقاومت ساختمان‌های جدیدالاحداثی که توسط سازمان‌های اجرایی و نهادهای مسئول ساخته شده‌اند و حتی دارای تیرهای کلاف‌کننده بصورت افقی و قائم بوده‌اند (و به‌عنوان ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله طراحی و اجرا شده بودند) اتصالات سازه‌ای غیرمقاوم در برابر نیروهای افقی، اجرای کلاف‌بندها با یک عدد میلگرد، استفاده از مصالح غیرمقاوم در برابر نیروهای جانبی، مهار نشدن میلگردهای قائم در سقف و عدم رعایت توصیه‌های آیین‌نامه‌ها بوده است.

این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از مصالح با وزن کمتر و مقاومت خمشی بیشتر، نظارت و کنترل دقیق بر روش‌های اجرا و ساخت ساختمان، دقت در اجرای جزئیات و اتصالات سازه‌ای ساختمان، توجه به نقاط تمرکز تنش در ساختمان می‌تواند در کاهش خسارات و صدمات ناشی از زلزله خصوصاً در ساختمان‌های روستایی مؤثر واقع گردد.

نتایج این تحقیق براساس مطالعه رفتار گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات نشان‌دهنده آنست که بمنظور احتراز از وارد شدن مجدد زیانهای عظیم انسانی و مالی بر جامعه خصوصاً جمعیت روستایی کشور ضروری است ضوابط آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (از جمله توصیه‌های آئین‌نامه ۲۸۰۰ در مورد ساختمان‌های با مصالح بنایی) دقیقاً رعایت گردد و بر محدودیت استفاده از سیستم‌های ترکیبی در سازه ساختمان‌ها تأکید گردد. در این زمینه تهیه دستورالعمل‌های اجرایی لازم توسط سازمانهای مسئول در امر ساخت ساختمان‌های مسکونی و بازسازی مناطق زلزله زده براساس نتایج این تحقیق و تحقیقاتی از این گونه ضروری بشمار می‌رود.

کلید واژه:

زلزله، ساختمان، معماری، تخریب، قائنات، روستاهای: اردکول، آبیز، اسفدن، حاجی‌آباد، افین و بشیران.

---

*. این تحقیق با استفاده از اعتبارات معاونت پژوهشی دانشگاه تهران در سال ۱۳۷۷ در دانشکده هنرهای زیبا دانشگاه تهران انجام گرفته است که بدینوسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران و دانشکده هنرهای زیبا تشکر و قدردانی می‌نماید.

**. استادیار گروه آموزشی معماری دانشکده هنرهای زیبا ـ دانشگاه تهران.

مقدمه:

امروزه با وقوع زلزله‌های پیاپی و متوالی، بدون نیاز به ارائه آمار و مستندات فراوان می‌توان دریافت که زلزله یکی از اساسی‌ترین مسائل جامعه مهندسی کشور می‌باشد به‌نحوی که ضرورت پرداختن به آن امری بدیهی به‌نظر می‌رسد. تجربیات تلخ زلزله‌ها که به بهای جان و مال آحاد ملت اندوخته می‌شود باید در جهت تحلیل و شناخت واقعی و عمیق آثار زلزله بر ساختمان‌ها و جلوگیری از تکرار چنان زیان‌های انسانی و اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد. با ارائه و ثبت این تجربیات می‌توان به اصول طراحی مناسب و ضوابط اجرای صحیح ساختمان‌ها دست یافت و از این رهگذر به رشد و پیشرفت طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در تمام جنبه‌ها و ابعاد آن یاری نمود.

این مقاله براساس نتایج حاصل از بررسی تخریب ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات و روستاهای زلزله‌زده جنوب خراسان پس از زلزله اردیبهشت ماه ۱۳۷۶ با استفاده از مطالعات، برداشت‌ها و تحقیقات انجام شده پس از وقوع زلزله در منطقه قائنات تهیه گردیده است. بدون شک استفاده از چنین موقعیتهای خاص زمانی و مکانی برای ارزیابی نتایج از طراحی‌ها و ساخت و سازهای انجام شده در گذشته (که با فرض مقاوم بودن ساختمان‌ها در برابر زلزله صورت گرفته‌اند) فوق‌العاده لازم و ضروری می‌باشد. در این مقاله میزان تخریب، کیفیت تخریب و شدت تخریب گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات در اثر زلزله اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ مورد بررسی دقیق رفتار ساختمان‌هایی است که غالباً با فرض مقاوم بودن در برابر زلزله ساخته شده بودند اما هنگامی که در معرض زلزله (با شدت ۷/۴ در مقیاس ریشتر) قرار گرفتند، متأسفانه بسیاری از آنها دچار صدمات اساسی شده و یا به کلی تخریب گردیده‌اند.

ضرورت انجام تحقیق:

نیمی از ساختار جمعیتی کشور را جامعه روستایی تشکیل می‌دهد. از سوی دیگر تقریباً تمام نقاط ایران برروی کمربند زلزله قرار داشته و همواره در معرض خطر وقوع زلزله قرار دارند. در عین حال متأسفانه جامعه وسیع روستایی کشور از آمادگی لازم برای مقابله با این پدیده طبیعی برخوردار نمی‌باشد. تجارب حاصل از زلزله‌های پیشین گویای این مطلب است که خانه‌های روستایی (با ساخت و ساز خشتی و گلی) از آسیب‌پذیرترین ابنیه بشمار می‌روند.

درپی فعال شدن گسل شمال غربی ـ جنوب شرقی اردکول در ۲۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ در منطقه قائنات واقع در جنوب خراسان زلزله‌ای با شدت ۷/۴ درجه در مقیاس ریشتر بوقوع پیوست و روستاهای بسیاری را ویران ساخت. بیش از ۱۷۰۰ نفر در این حادثه جان خویش را از دست دادند و ده‌ها روستا بکلی ویران گردید، صدها ساختمان تخریب شد و هزاران نفر بی‌خانمان گردیدند.[۱] بسیاری از این ساختمان‌ها پس از زلزله سال ۱۳۵۸ ساخته شده بودند و با عنوان ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله طراحی گردیده بودند. همچنان که روستاهای زلزله زده منطقه قائنات غالباً روستاهای بازسازی شده پس از زلزله سال ۱۳۵۸ بودند که مجدداً در معرض زلزله‌ای با چنین شدت واقع می‌گردیدند، اما متأسفانه بی‌دفاع و ناتوان در برابر زلزله بار دیگر صدها قربانی را در خود جای دادند.

تصویر زیر بافت سنتی تخریب شده روستای اردکول، یکی از روستاهای صدمه دیده در زلزله اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ منطقه قائنات که حاصل عدم توجه به اصول طراحی و اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله می‌باشد را نشان می‌دهد. (تصویر شماره ۱)

تصویر شماره ۱. روستای اردکول
(بافت سنتی تخریب شده در اثر زلزله)

امروزه با توجه به اینکه اکثر خانه‌های روستایی کشور حتی تحمل زلزله‌های با شدت متوسط را ندارند، پرداختن به رفتار این‌گونه ساختمان‌ها در برابر زلزله به منظور دستیابی به ضوابط مقاوم‌سازی این ابنیه و تأکید بر رعایت اصول فنی در اجرای ساختمان‌ها بیش از پیش ضروری بنظر می‌رسد.

هدف تحقیق:

هدف این تحقیق بررسی تحلیلی صدمات و خسارات ناشی از زلزله منطقه قائنات بر ساختمان‌های جدیدالاحداث این منطقه (که در گذشته نه چندان دور تحت تأثیر زلزله دیگری قرار گرفته بود) می‌باشد. ساختمان‌های مذکور غالباً به عنوان ساختمان‌های مقاوم

در برابر زلزله طراحی و اجرا شده بودند، لیکن تعداد قابل توجهی از این ساختمان‌ها در اثر زلزله اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ دچار صدمات جدی گردیدند که سبب بروز خسارات عمده‌ای از نظر جانی و مالی گردید.

هدف این تحقیق دستیابی به نتایجی است که به کمک آن بتوان از تکرار چنین خسارات عظم جانی و مالی جلوگیری نمود. نتایج و دستاوردهای حاصل از این بررسی باید در ساختن ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله و خصوصاً بازسازی مناطق زلزله‌زده به دقت مورد توجه قرار گیرد.

روش تحقیق:

در این تحقیق ابتدا ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات به دو دسته اساسی تقسیم شده‌اند:

۱. ساختمان‌های ساخته شده توسط مردم از طریق نهادهای مردمی و معتمدین فنی آنان.

۲. ساختمان‌های مسکونی اجرا شده توسط سازمان‌های مسئول و نهادهای اجرایی.

سپس براساس مطالعات میدانی به عمل آمده پس از وقوع زلزله به بررسی تحلیلی صدمات وارده بر ساختمان‌ها پرداخته و با توجه به ضوابط و مقررات آئین‌نامه‌های مربوطه مانند آئین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله[۲] و سایر مقررات ساختمانی دلایل بروز صدمات و راه‌حل‌های جلوگیری از وقوع چنین خساراتی نتیجه‌گیری شده است.

منظور از مقایسه گونه‌های مختلف در این تحقیق، مقایسه یک به یک این ساختمان‌ها نمی‌باشد بلکه مقصود مشخص کردن و نمایاندن ویژگی‌های ساختاری گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه زلزله‌زده بوده است. چه اینکه در مناطق زلزله‌زده نه آنقدر تنوع ساختار وجود دارد که بتوان مقایسه‌ای این‌گونه انجام داد و نه ویژگی‌های ساختمان‌ها، مقاومت خاک، نوع مصالح، روش‌های ساختمانی، کاربری‌ها، شدت و شتاب زلزله و دارای شرایط مشابهی هستند که زمینه انجام چنین مقایسه‌ای فراهم گردد.

پیشینه تحقیق

آخرین تحقیقات انجام‌شده در ارتباط با مشخصات تکتونیکی منطقه زلزله نشان می‌دهد زمین‌لرزه‌ای که ساعت ۱۲:۲۸ ظهر روز شنبه ۱۳۷۶/۶/۲۰ در منطقه قائنات به‌وقوع پیوست همراه با دگرریختی پوسته زمین در امتداد گسلی سطحی به طول ۱۲۶ کیلومتر بوده است که گسل اردکول نامیده می‌شود.

سیمای گسل اردکول در روی زمین پیوسته نبوده، بلکه از قطعات متعددی (Segments) تشکیل شده است. امتداد گسل اردکول در قطعات مختلف بین N12E تا N40W تغییر می‌کند، ولی روند کلی آن N350 است. شیب صفحه گسل نزدیک به قائم و جهت شیب آن به سمت غرب ـ شمال غربی می‌باشد.[۸]

پس از وقوع زلزله گروه‌های بسیاری در محل روستاهای تخریب شده به بررسی علمی آثار ناشی از زلزله پرداختند که نتایج آن‌ها طی گزارش‌ها و یا مقالاتی منتشر گردیده است. در تحقیقات منتشر شده قبلی زلزله منطقه قائنات از دیدگاه‌ها زمین‌شناسی و تکتونیکی[۸] و یا آثار لرزه‌ای قبل و بعد از زلزله[۶] مورد بررسی قرار گرفته و در مواردی تخریب‌های واقع شده در اثر اجرای نامناسب[۹] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در تحقیقات مشابهی این صدمات در گونه خاصی از ساختمان‌ها (از نظر مصالح تشکیل‌دهنده) مثلاً ساختمان‌های بتن مسلح[۵] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تعدادی از بررسی‌ها و تحقیق‌های انجام شده نیز به ارائه گزارش‌های تحلیلی[۱] و علمی[۴] از این حادثه دردناک پرداخته‌اند.[۷]

اما آنچه در این تحقیق و مطالعه میدانی آن مورد نظر بوده است بررسی مقایسه‌ای رفتار گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در این منطقه و استنتاج شرایط و ویژگی‌هایی است که سبب صدمه دیدن، تخریب و یا عدم تخریب هریک از این گونه‌ها گردیده است که نتایج آن در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد.

ساختار مقاله:

پس از بیان مقدمه، ضرورت تحقیق، هدف تحقیق و روش انجام آن، پیشینه تحقیق، این مقاله شامل سه بخش دیگر به شرح زیر می‌باشد:

در اولین بخش مقاله به بررسی رفتار ساختمان‌های ساخته شده توسط مردم و معتمدین فنی آنها می‌پردازیم. در میان این‌گونه از ساختمان‌ها، مسجد روستای آبیز، گرمابه روستای اسفدن، مسجد روستای اسفدن، انبار مصالح ساختمانی حاجی‌آباد و ساختمان حوزه علمیه روستای حاجی‌آباد مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در دومین بخش مقاله رفتار ساختمان‌های مسکونی اجرا شده توسط سازمان‌های مسئول و نهادهای اجرایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در میان این گونه از ساختمان‌ها، به بررسی ساختمان‌های مسکونی اجرا شده در روستاهای اردکول، حاجی‌آباد، اسفدن، افین و بشیران با شیوه‌های ساخت و ساز متفاوت می‌پردازیم.

در بخش نتیجه‌گیری دستاوردها و نتایج حاصل از مطالعات و بررسی‌های فوق ارائه می‌گردد.

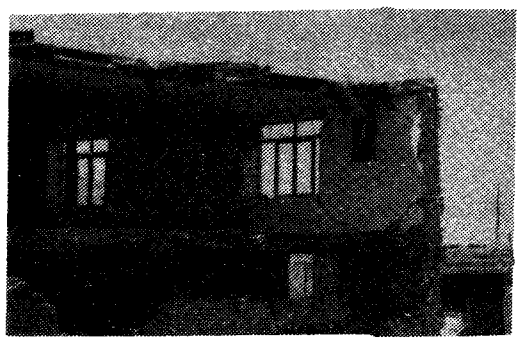
۱. ساختمان‌های ساخته شده توسط مردم از طریق نهادهای مردمی و معتمدین فنی آنان:

در این بخش به تجزیه و تحلیل رفتار و میزان تخریب ساختمان‌هایی می‌پردازیم که طراحی، نظارت و اجرای آن بعهده مردم و یا نهادهای مردمی به کمک معتمدین فنی آنها بوده است. این بناها به دلیل کاربری عمومی دارای اهمیت نسبی بالاتری بوده و ایمن‌سازی آنها نسبت به سایر ساختمان‌ها از ضرورت بیشتری برخوردار بوده است.

تجزیه و تحلیل و نیز مقایسه رفتار این‌گونه ساختمان‌ها در برابر زلزله که چندین نمونه آن ذیلاً معرفی می‌گردد نشان‌دهنده آن است که معماران محلی و یا به اصطلاح معتمدین فنی مردم باید از آموزش‌های لازم در زمینه ساختِ ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله بهره‌مند گردند.

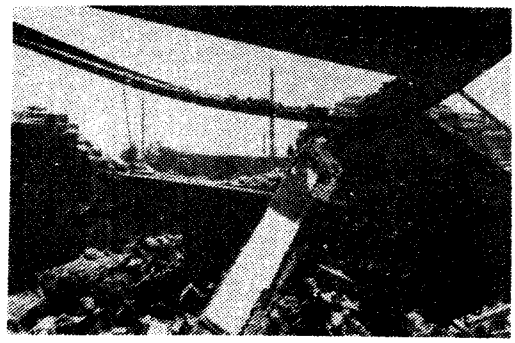
۱ـ۱. مسجد روستای آبیز:

ساختمان این مسجد با بهره‌گیری از یک نظام ساختاری مختلط (دیوارهای باربر پیرامونی و اسکلت فلزی درون آن) و بدون در نظر گرفتن تدابیر لازم برای مقابله با زلزله مانند پیش‌بینی کلاف‌های افقی و قائم اجرا شده است و به‌دلیل عدم رعایت ضوابط مذکور، دچار صدمات اساسی کرده است.[۹] (تصویر شماره ۲)



تصویر شماره ۲. ساختمان تخریب شده مسجد روستای آبیز

دلیل اصلی عدم پایداری این بنا در مقابل زلزله را می‌توان ترکیب ناسازگاری دو سیستم ساختمانی مختلف (دیوار باربر و ستون‌های فلزی) همراه با اجرای غیر صحیح جزئیات این دو سیستم دانست. تغییر شکل افقی بسیار زیاد ساختمان در اثر نیروهای جانبی و عدم مقاومت دیوارهای پیرامونی در برابر نیروهای افقی منجر به تخریب بنا گردیده است. علاوه بر فقدان یک سیستم ساختمانی یکپارچه و همگن، دیوارچینی غیراصولی با درزهای قائم ممتد در ارتفاع دیوار از اشکالات اصلی در عدم مقاومت ساختمان در برابر زلزله بوده است.[۳] (تصویر شماره ۳)



تصویر شماره ۳.
فروریختن سقف مسجد در اثر حرکت جانبی دیوارها

علاوه بر اجرای ناصحیح دیوارها، قرارگیری تیرهای سقف بر تکیه‌گاه‌های نامناسب (با عرض تکیه‌گاهی غیرکافی) موجب عدم پایداری سقف در اثر حرکت جانبی دیوارها و نهایتاً تخریب ساختمان گردیده است. از سوی دیگر عناصر الحاقی همچون پله و مناره نیز به گونه‌ای مناسب با ساختار کلی بنا ترکیب نیافته‌اند به نحوی که یکپارچگی لازم بین قسمت‌های مختلف ساختمان ایجاد نگردیده است.[۹]

۱ـ۲. گرمابه روستای اسفدن:

ساختمان گرمابه روستای اسفدن با بهره‌گیری از سیستم دیوار باربر و اجرای صحیح این سیستم ساختمانی از جمله پیش‌بینی کلاف‌بندی‌های قائم و افقی پایداری نسبی در برابر زلزله از خود نشان داده است. (تصویر شماره ۴)

تصویر شماره ۴. گرمابه روستای اسفدن

رعایت اصول مقاوم‌سازی در برابر زلزله از طرف مجری و معمار ساختمان که صاحب گرمابه نیز هست و دقت به عمل آمده در طراحی و اجرای ساختمان سبب مقاومت نسبتاً خوب این ساختمان در برابر زلزله بوده است بنحوی که پایداری کلی بنا در برابر زلزله حفظ گردیده است.[۴] بررسی دقیق رفتار این بنا در برابر زلزله نشان‌دهنده آن است که ترکیب حجمی مناسب ساختمان، استفاده از پلان ساده و متقارن، عدم وجود پیش‌آمدگی‌های نامناسب در پلان و مقطع ساختمان، عدم تعبیه بازشوهای غیراصولی در بنا، استفاده از کلاف‌بندی افقی و قائم، اجرای صحیح ساختمان و استفاده از مصالح با کیفیت مناسب مهمترین دلایل رفتار مناسب این ساختمان و پایداری کلی آن در برابر زلزله بوده است.[۵]
(تصویر شماره ۵)

تصویر شماره ۵.
مصون ماندن ساختمان از تخریب در اثر زلزله

۱ـ۳. مسجد روستای اسفدن:

سیستم ساختمانی این مسجد ترکیب دیوارهای باربر پیرامونی و اسکلت فلزی درون آن بوده است و به منظور مقابله با نیروهای جانبی کلاف‌هایی افقی در تراز پی دیوارها و زیر سقف در نظر گرفته شده است. همچنین کلاف‌های قائم در قسمت‌هایی از ساختمان پیش‌بینی و اجرا شده است. مهمترین صدمات و تخریب‌ها در این ساختمان شامل فروریختن قسمتی از دهانه‌های انتهایی بنا و تخریب‌هایی در گوشه‌های ساختمان بوده است.

به‌دلیل عدم کلاف‌بندی تیرآهن‌های سقف بوسیله میلگرد و یا تسمه فولادی انسجام و یکپارچگی کامل سقف حاصل نگردیده و تشکیل دیافراگم صلب در سقف صورت نگرفته است و تمرکز نیروها بعلاوه رانش طاق در آخرین طاق‌های ضربی سبب فروریختن دهانه‌های انتهایی سقف شده است.[۹] (تصویر شماره ۶)

تصویر شماره ۶.
فروریختن دهانه انتهایی سقف مسجد روستای اسفدن

از سوی دیگر عدم پیش‌بینی تکیه‌گاه‌های با عرض کافی در آخرین طاق ضربی سقف، عدم اتصال مناسب کلاف‌های قائم با دیوارها و نیز اجرای غیرصحیح اتصال سقف و دیواره سبب بروز صدماتی در گوشه‌های ساختمان شده است.[۳] (تصویر شماره ۷)

تصویر شماره ۷. صدمات وارد شده به گوشه‌های ساختمان

همچنین عبور مجراهای تأسیساتی همچون دودکش‌ها از درون تیرهای کلاف نیز سبب تضعیف تیرهای کلاف‌کننده و اختلال در رفتار مناسب کلاف‌های افقی در تراز زیر سقف گردیده است. (تصویر شماره ۸)

تصویر شماره ۸. تضعیف کلاف‌بندی افقی ساختمان بوسیله عبور مجراهای تأسیساتی مانند دودکش‌ها

از سوی دیگر کیفیت غیرمناسب بتن اجرا شده، عدم استفاده از دانه‌بندی مناسب و مصالح سنگی شسته، عدم اجرای صحیح اتصال کلاف‌های قائم با دیوارها و عدم پیش‌بینی مهارهای مناسب از نوع میلگردهای فولادی، سبب بروز صدمات بیشتری در گوشه‌های ساختمان گردیده است.[۹] (تصویر شماره ۹)

تصویر شماره ۹. اجرای نامناسب کلاف‌های قائم بتنی

۱ـ۴. ساختمان انبار مصالح ساختمانی روستای حاجی‌آباد:

نظام ساختاری این ساختمان متشکل از دیوار باربر پیرامونی و دو ستون در وسط ساختمان بوده و سقف نیز با طاق ضربی پوشانده شده است. ساختمان فوق فاقد کلاف‌بندی در تراز زیر دیوار و یا کلاف‌های قائم بوده ولی از تیرآهن‌هایی در تراز زیر سقف که نقش نعل درگاه را نیز داشته‌اند، به عنوان کلاف افقی استفاده شده است.[۴] ساختمان مزبور به دلیل عدم برخورداری از پیوستگی و یکپارچگی مناسب بین دیوارها و سقف و نهایتاً عدم تشکیل یک سیستم مقاوم سه بُعدی بکلی منهدم و تخریب شده است. (تصویر شماره ۱۰)

تصویر شماره ۱۰.
ساختمان انبار مصالح ساختمانی روستای حاجی‌آباد

به‌دلیل فقدان یک ساختار مقاوم و صلب در سقف و عدم اتصال مناسب سقف با دیوارها به عنوان تکیه‌گاه آن، تمامی یقف در اثر حرکت جانبی دیوارها فروریخته است. گرچه تیرهای طاق ضربی سقف به دلیل وجود میلگردهای مهاری همچنان متصل به یکدیگر باقی مانده‌اند.[۴] (تصویر شماره ۱۱)

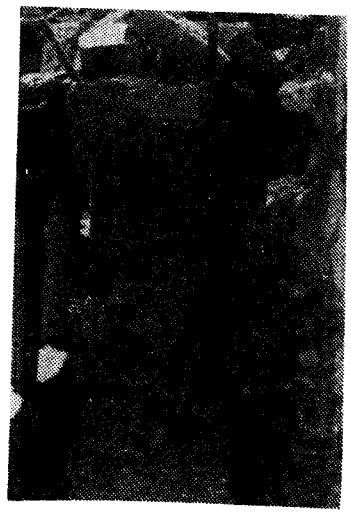
تصویر شماره ۱۱. فروریختن کامل سقف در اثر عدم پایداری دیوارها

۱ـ۵. ساختمان حوزه علمیه روستای حاجی‌آباد:

نظام ساختاری این ساختمان متشکل از دیوار باربر و سقف طاق‌ضربی می‌باشد. کلاف‌های بتنی قائم و افقی نیز به منظور مقابله با نیروهای جانبی طراحی و اجرا گردیده‌اند. (تصویر شماره ۱۲)

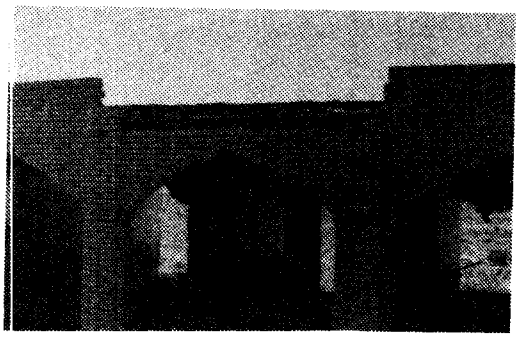
تصویر شماره ۱۲.
ساختمان حوزه علمیه روستای حاجی‌آباد

اما عدم توجه به اجرای صحیح اتصالات به عنوان عوامل اصلی پیوستگی و انسجام ساختار سه بُعدی بنا، عدم استفاده از بتن با کیفیت مناسب در اجرای کلاف‌های قائم و افقی، عدم مهاربندی تیرهای سقف، عدم اجرای تکیه‌گاه‌های مناسب و کافی، عدم رعایت حداقل طولهای تکیه‌گاهی سبب وارد شدن صدمات عمده و تخریب نسبی بنا گردیده‌اند. طراحی و اجرای کلاف‌های قائم بسیار نامناسب و غیر اصولی انجام شده است. ضعف دانه‌بندی، عدم رعایت طول مشترک کافی، عدم اجرای خاموت‌ها در فواصل مناسب و اجرای ناصحیح اتصالات دلایل اصلی بروز عملکرد بسیار ضعیف و نامطمئن کلاف‌های قائم و افقی در ساختمان بوده است. از معدود عناصر مقاوم در برابر زلزله در این ساختمان قوس‌هایی هستند که در جهت عمود بر امتداد زلزله به دلیل یکپارچگی و مقاومت برشی قابل توجه به صورت پایدار باقی مانده‌اند.[۳] (تصاویر شماره ۱۵-۱۳)



تصویر شماره ۱۳. صدمات وارد بر ساختمان و عدم پایداری تیرهای کلاف‌کننده

تصویر شماره ۱۴.
فروریختن کامل سقف در اثر ناپایداری کلی ساختمان



تصویر شماره ۱۵.
نمای ورودی مدرسه علمیه و قوس‌های باقیمانده پس از زلزله

۲. گونه‌های مختلف ساختمان‌های مسکونی اجرا شده توسط سازمانهای مسئول و نهادهای اجرایی:

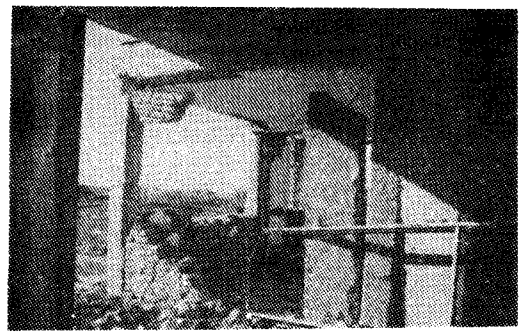
این بخش از مقاله شامل بررسی ساختمان‌های مسکونی است که سازمان‌های دست‌اندرکار طراحی، مشاوره، نظارت و اجرای آن وابسته به دولت و یا نهادهای رسمی بوده‌اند. خواه دستگاه‌هایی که بطور مستقیم مسئول امر ساخت و ساز مسکن به صورت انبوه هستند و به عنوان دستگاههای اجرایی مسئول در این زمینه شناخته می‌شوند (مانند بنیاد مسکن انقلاب و سازمان مسکن) و خواه سازمان‌ها و دستگاههایی که در محدوده فعالیت‌ها و برنامه‌های عمرانی و اقتصادی خویش اندام به ساخت و ساز مسکن می‌نمایند (مانند بانک مسکن).

این ساختمان‌ها با داشتن امکانات فنی و مهندسی بیشتر در مرحله طراحی و اجرا و به دلیل استفاده از سازمان‌های منسجم و گسترده اجرایی باید دارای مقاومت بیشتر و بالاتری نسبت به سایر گونه‌ها باشند.

اکثر این ساختمان‌ها پس از زلزله سال ۱۳۵۸ با عنوان ساختمان‌های مسکونی مقاوم در برابر زلزله طراحی و اجرا شده‌اند که در این بخش رفتار آنها در برابر زلزله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

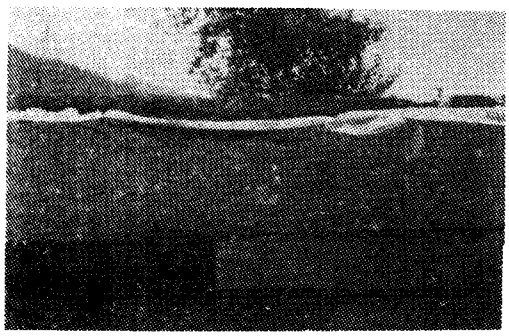
۲ـ۱. خانه‌های مسکونی روستای اردکول (قاب خمشی بتن مسلح):

این خانه‌ها با استفاده از قاب فضایی خمشی بتن مسلح و اتصالات صلب ساخته شده‌اند. این واحدهای مسکونی یک طبقه پس از زلزله سال ۵۸ توسط یکی از وزارتخانه‌های مسئول ساخت و ساز مسکن در تعدادی از روستاهای منطقه طراحی و اجرا گردیده است. علیرغم استفاده از سازه بتنی، بروز اشکالات عمده در رفتار ساختمان در برابر زلزله موجب تخریب کامل خانه‌ها گردیده است. دلیل اصلی تخریب این ساختمان‌ها اجرای غیرصحیح اتصالات و عدم مقاومت کافی آنها در برابر نیروهای زلزله بوده است.[۱] (تصویر شماره ۱۶)



تصویر شماره ۱۶.
خانه‌های مسکونی روستای اردکول پس از زلزله

ضعف اتصالات ساختمان خصوصاً در اتصال ستون و سقف با عدم رعایت طول مهاری لازم، عدم استفاده از خمهای مناسب و استاندارد، استفاده از میلگرد ساده، پوشش غیرکافی بتن برروی میلگردها و عدم اجرای تیرهای با مقطع ۶۰ × ۴۰ سانتیمتر برای دهانه‌های حداکثر تا ۳۸۰ سانتیمتر حاکی از اشتباه در محاسبه و طراحی سازه ساختمان بوده و منجر به سنگینی بیش از حد سقف و ایجاد تنش‌های بسیار شدید در محل اتصال سقف با ستون گردیده و نهایتاً منجر به گسیختگی و از بین رفتن اتصال شده است.[۴] علاوه بر نواقص و اشکالات فوق اضافه شدن جرم عظیمی از توده‌های کاهگل (به منظور عایق نمودن سقف) برروی بام ساختمان‌ها سبب افزایش بسیار زیاد نیروهای افقی ناشی از شتاب زلزله و افزایش قابل توجه نیروهای زلزله بر ساختمان‌ها شده است.[۹] (تصاویر شماره ۱۷ و ۱۸)

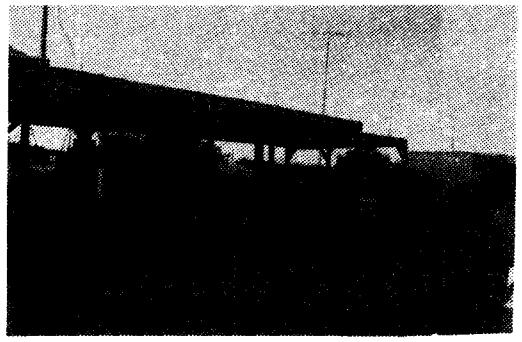


تصویر شماره ۱۷.
تخریب سازه بتنی در اثر گسیختگی اتصالات

تصویر شماره ۱۸. ضخامت و جرم بسیار زیاد سقف سبب افزایش شدید نیروهای زلزله وارد بر ساختمان گردیده است.

۲ـ۲. ساختمان‌های مسکونی روستای حاجی‌آباد (اسکلت فلزی):

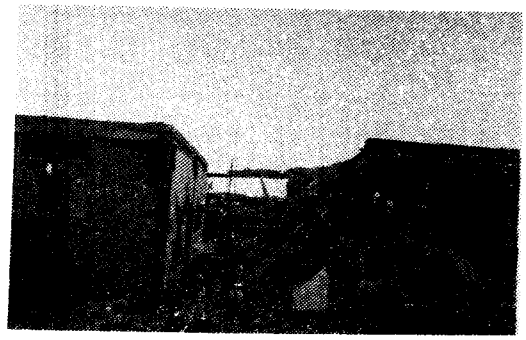
نظام ساختاری این ساختمان‌ها ترکیب اسکلت فلزی و سقف طاق ضربی بوده است. به منظور مقابله با نیروهای جانبی از مهاربندی با میلگردهای فولادی و در مواردی از اتصالات ۴۵ درجه در زیر سقف استفاده شده است. این ساختمان‌ها بصورت تیپ و بصورت واحدهای همسایگی متشکل از دو واحد مسکونی طراحی و اجرا شده‌اند. اگر چه سازه فولادی این گونه ساختمان‌ها بصورت کلی پایدار باقی مانده است ولی ضعف‌های آشکاری در نحوه طراحی و اجرای این ساختمان‌ها ملاحظه می‌شود. طراحی و اجرای ستون‌های فلزی از مقاطع با مقاومت خمشی اندک و عدم استفاده از مهاربندی کافی سبب تغییر شکل جانبی قابل توجه سقف گردیده است.[۷] (تصویر شماره ۱۹)



تصویر شماره ۱۹.
ساختمان‌های مسکونی روستای حاجی‌آباد

سقف قسمت الحاقی به ساختمان که پس از اجرای ساختمان اصلی ساخته شده است به دلیل واقع شدن بر تکیه‌گاهی با اتصال ضعیف و عدم برخورداری از یک سیستم سازه‌ای مستقل جهت انتقال نیروهای عمودی و افقی بصورت کامل فروریخته است. (تصاویر شماره ۲۰ و ۲۱)

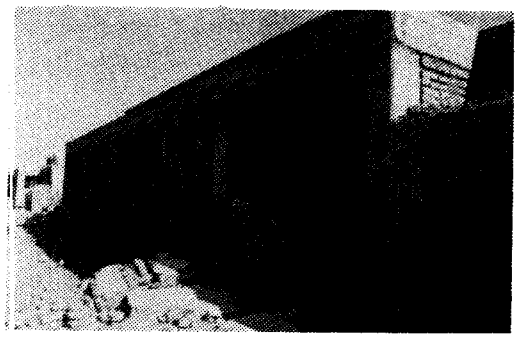
تصویر شماره ۲۰.
تغییر مکان بیش از حد سقف به‌دلیل فقدان مهاربندی کافی



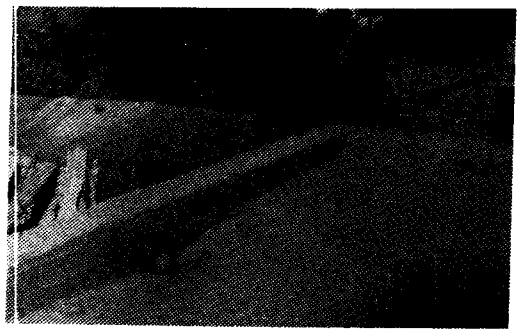
تصویر شماره ۲۱.
فروریختن سقف قسمت الحاقی در اثر اتصال ضعیف سقف

۲ـ۳. ساختمان‌های مسکونی روستای اسفدن (قاب بتنی):

نظام ساختاری این‌گونه از ساختمان‌ها متشکل از قاب بتنی با اتصالات گیردار و سقف بتنی می‌باشد. این ساختمان‌ها بطور کلی در برابر زلزله پایدار باقی مانده‌اند و بیشترین آسیب‌های وارد براین ساختمان‌ها، صدمات وارد بر عناصر غیرسازه‌ای است. گرچه برخی از این آسیب‌ها همچون فروریختن دیوارهای بین قاب‌ها منجر به صدمات جانی گردیده است. فروریختن دیوارهای بین قاب‌ها عمدتاً به دلیل مهار نشدن آنها درون قابهای بتنی صورت گرفته است. این ضعف و نیز شیوه نامناسب دیوارچینی در ساختمان همچنین وزن بسیار زیاد سقف در بعضی از ساختمان‌ها سبب بروز چنین تخریب‌هایی گردیده است.[۳] (تصاویر شماره ۲۲ و ۲۳)



تصویر شماره ۲۲. ساختمان‌های مسکونی روستای اسفدن



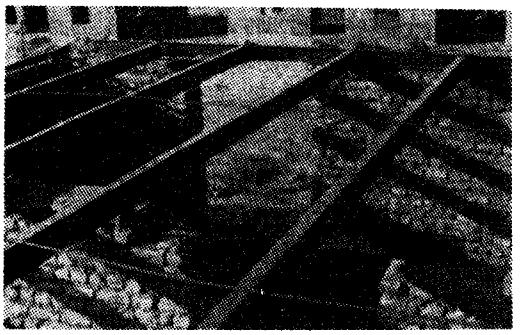
تصویر شماره ۲۳. نیروهای ثقلی شدید ناشی از ضخامت بیش از حد مجاز لایه‌های کاهگل

۲ـ۴. واحدهای مسکونی روستای افین (دیوار باربر با کلاف‌های قائم با یک عدد میلگرد):

این واحدهای مسکونی دارای نظام ساختاری دیوار باربر ۳۵ سانتیمتری و سقف طاق ضربی می‌باشند.

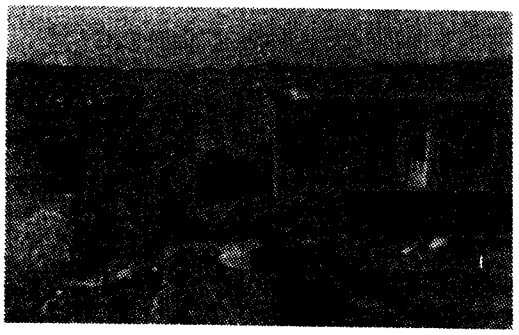
بمنظور مقابله با نیروهای جانبی از کلاف‌های افقی در تراز زیرسقف (از نوع تیرآهن‌های فولادی) و در تراز زیر دیوار (از نوع بتن مسلح) و نیز اجرای کلاف‌های قائم (با یک عدد میلگرد درون آن) استفاده شده است. پی‌های این ساختمان‌ها از نوع شفته آهکی و کرسی‌چینی دیوارها از سنگ بوده است. برای تراز کردن سطح زیرین کلاف‌های افقی بتن مسلح یک ردیف آجرچینی برروی پی‌ها صورت گرفته است. وجود تنها یک عدد میلگرد قائم در کلاف‌های افقی ۴۰ × ۳۰ سانتیمتر سبب عدم کارایی این کلاف‌ها و بروز صدمات عمده بر ساختمان در اثر زلزله گردیده است.[۹] دیوارچینی این ساختمان‌ها خصوصاً در گوشه‌ها با دقت لازم صورت نگرفته است و به همین دلیل ترکهای قائم بسیاری از گوشه‌های ساختمان ایجاد گردیده است.[۷] عدم اتصال مقاوم و مطمئن میلگردهای کلاف‌های بتنی قائم با تیرهای سقف و کلاف‌های افقی عملاً وجود آنرا کم اثر نموده است و نهایتاً کمکی به تشکیل یک ساختار مقاوم سه بُعدی ننموده است. (تصاویر شماره ۲۴ و ۲۵)

تصویر شماره ۲۴. خانه‌های مسکونی روستای افین



تصویر شماره ۲۵. نحوه تیرریزی سقف ساختمان‌ها

از سوی دیگر استفاده از نبشی به عنوان تکیه‌گاه آخرین دهانه طاق ضربی، سقف را بسیار آسیب‌پذیر نموده است. میلگردهای مهارکننده تیرهای طاق ضربی که در سطح سقف قرار دارند تا آخرین دهانه امتداد نیافته‌اند. به‌همین دلیل در بسیاری موارد طاق ضربی در آخرین دهانه فروریخته است.[۴] (تصاویر شماره ۲۶ و ۲۷)



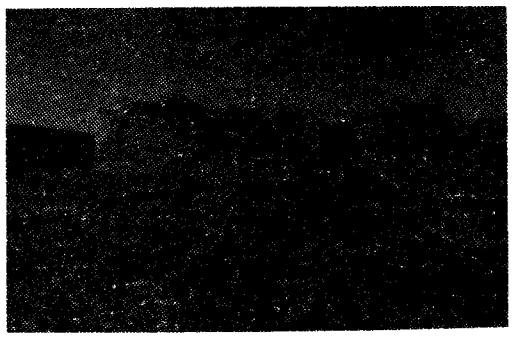
تصویر شماره ۲۶.
استفاده از نبشی به‌عنوان تیر انتهایی سقف

تصویر شماره ۲۷.
فروریختن آخرین دهانه از طاق‌های ضربی سقف

۵-۲. واحدهای مسکونی روستایی بشیران (با کلاف‌های قائم تک میلگردی):

نظام ساختاری این ابنیه متشکل از دیوار باربر ۳۵ سانتیمتری و سقف طاق ضربی می‌باشد. این ساختمان‌ها دارای کلاف افقی در تراز زیر سقف (از نوع تیرآهن‌های فولادی) و در تراز زیر دیوار (از نوع بتن مسلح) و همچنین دارای کلاف‌های قائم (با یک عدد میلگرد درون آن) می‌باشند.

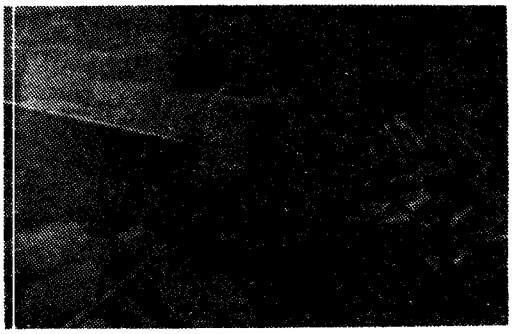
قابل ذکر است که این ساختمان‌ها چنانچه با رعایت آیین‌نامه زلزله اجرا می‌شد، اجرای آن موفق‌تر و رفتار آنها در برابر زلزله مطلوب‌تر می‌گردید. لذا شایسته است بر اجرای آئین‌نامه در مورد این گونه ساختمان‌ها تأکید بیشتری به عمل آید (تصویر شماره۲۸).



تصویر شماره ۲۸.
تخریب ساختمان‌های مسکونی روستای بشیران در اثر زلزله

یکی از مهمترین ضعفهای بنا دیوارچینی نامناسب و عدم دقت در آجرچینی نقاط بروز تمرکز نیرو و تنش در بنا مانند گوشه‌های ساختمان می‌باشد. استفاده از کلاف‌های قائم با یک میلگرد شرایط عملکرد مناسب کلاف قائم در بارگذاری‌های متغیر و متفاوت را ایجاد نمی‌نماید و عملاً موجب بوجود آمدن ساختار سه بُعدی در ساختمان و رفتار مناسب در برابر زلزله نمی‌گردد.[۳]
(تصاویر شماره ۲۹ و ۳۰)

تصویر شماره ۲۹. اجرای ناصحیح دیوارچینی در گوشه‌های ساختمان



تصویر شماره ۳۰.
عدم پایداری کلاف‌های قائم با یک میلگرد درون آن

نتیجه‌گیری:

نتایج حاصل از این مطالعه و تحقیقات را می‌توان در پنج بخش بشرح زیر ارائه نمود:

الف: بررسی رفتار ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات نشان‌دهنده این نتیجه مهم و اساسی است که گرچه در بسیاری موارد عامل تخریب ساختمان‌ها عدم رعایت ضوابط فنی و آیین‌نامه‌های ساختمانی موجود در کشور می‌باشد، اما در مواردی نیز نارسایی و عدم کفایت ضوابط و آیین‌نامه‌های موجود سبب بروز صدمات و یا تخریب‌هایی در ساختمان‌ها گردیده است. برخی از صدمات وارد بر ساختمان‌ها در زلزله منطقه قائنات (که به رعایت نسبی اصول و ضوابط آیین‌نامه‌های طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله اجرا شده‌اند) ناشی از عدم وجود ضوابط مشخص در بعضی از زمینه‌ها بوده است. در این راستا همچنان که در بررسی ساختمان‌های مسکونی روستای افین (بخش ۲-۴) و ساختمان‌های مسکونی روستایی بشیران (بخش ۲-۵) نتیجه‌گیری شد باید به ضرورت توجه بیشتر به نحوه اتصال و ایجاد یکپارچگی بین دیوارهای آجری و ستونهای با کلاف‌های بتنی و یا ضرورت محدود نمودن استفاده از سیستم‌های ساختمانی ترکیبی (مانند ترکیب دیوار باربر و ستونهای فلزی یا بتنی منفرد) در مقررات ملی ساختمانی و آیین‌نامه‌های اجرایی ساختمان‌ها اشاره نمود.

ب: بررسی رفتار ساختمان‌های ساخته شده مردم و یا نهادهای مردمی (همچنان که در بخش‌های ۱-۱ تا ۱-۵ مقاله نتیجه‌گیری گردید) نشان‌دهنده ضرورت آموزش عوامل دست‌اندرکار ساخت و ساز در زمینه اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله می‌باشد. این تحقیق نشان‌دهنده آن است که دلایل اصلی عدم مقاومت ساختمان‌های مذکور در برابر زلزله عبارتند از:

الف ـ عدم درک صحیح رفتار ساختمان

ب ـ ضعف طراحی معماری ساختمان
ج ـ عدم محاسبه و کنترل تنش‌ها و تغییر مکان سقف
د ـ نظارت غیرکافی در اجرای ساختمان
و ـ عدم رعایت ضوابط آیین‌نامه‌های زلزله

گرچه عامل اصلی فروریختن این گونه ساختمان‌ها عمدتاً عدم یکپارچگی بین دیوار و سقف و نهایتاً عدم تشکیل یک سیستم مقاوم سه بُعدی بوده است، لیکن در این راستا همچنان که در بررسی مسجد روستای آبیز (بخش ۱ـ۱) و گرمابه روستای اسفدن (بخش ۱ـ۲) و واحدهای مسکونی روستای افین (بخش ۲ـ۴) نتیجه‌گیری گردید نداشتن کلاف‌های افقی و قائم را می‌توان علت اصلی عدم یکپارچگی و مقاومت کافی بنا دانست.

این تحقیق نشان می‌دهد در کاهش خسارات و صدمات ناشی از زلزله در روستاها مؤثر واقع گردد.

۱. استفاده از مصالح با وزن کمتر و مقاومت خمشی بیشتر (نسبت مقاومت به وزن بالاتر)
۲. طراحی معماری با استفاده از فرم‌های مناسب در پلان و مقطع ساختمان
۳. نظارت و کنترل دقیق روشهای اجرا و ساخت ساختمان
۴. دقت در اجرای جزئیات و اتصالات سازه‌ای ساختمان
۵. توجه به نقاط تمرکز تنش در ساختمان
۶. نگهداری اصولی و تعمیرات به موقع ساختمان.

ج: تخریب بسیاری از گونه‌های مختلف ساختمان‌های مسکونی که پس از زلزله سال ۱۳۵۸ توسط سازمان‌های اجرایی و نهادهای مسئول ساخته شده‌اند نشان‌دهنده ضرورت نظارت دقیق‌تر بر مراحل طراحی و اجرای این ساختمان‌ها براساس ضوابط و مقررات ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله می‌باشد. همچنان که در بخش‌های ۲ـ۱ تا ۲ـ۵ مقاله به تفصیل ارائه گردیده است. گونه‌هایی از ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه (همانند خانه‌های مسکونی روستای اردکول، بخش ۲ـ۱) با وجود آنکه دارای عناصر کلاف‌کننده قائم و افقی بوده‌اند نیز دچار صدمات کلی گردیده‌اند. در این‌گونه ساختمان‌ها کلاف‌های قائم (به‌دلیل عدم اجرای صحیح و فقدان میلگرد به تعداد لازم در مقطع عرضی عناصر کلاف‌کننده ساختمان) سبب ایجاد یک سازه سه بُعدی مقاوم نگردیده‌اند. عدم اتصال و درگیری مناسب دیوارهای باربر با یکدیگر مخصوصاً در گوشه‌های ساختمان (همانند واحدهای مسکونی روستای افین)، مانع رفتار مناسب ساختمان در مقابل نیروهای جانبی ناشی از زلزله بوده است.

براساس نتایج این تحقیق، عوامل اصلی عدم مقاومت ساختمان‌های جدیدالاحداثی که حتی دارای تیرهای کلاف‌کننده بصورت افقی و قائم بوده‌اند (و به‌عنوان ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله طراحی و اجرا شده‌اند) عبارتند از:

۱. اتصالات سازه‌ای ضعیف و غیرمقاوم در برابر نیروهای افقی.
۲. عدم اتصال مقاوم و مطمئن میلگردهای کلاف‌های قائم با تیرهای سقف و کلاف‌های افقی.
۳. اجرای کلاف‌بندی‌های تک میلگرد (که از نظر آیین‌نامه‌های زلزله غیرقابل قبول می‌باشند).
۴. امتداد نیافتن میلگردهای مهار تیرهای طاق ضربی تا دهانه آخر.
۵. استفاده از مصالح غیرمقاوم در برابر نیروهای جانبی (مانند سنگ و آجر) به عنوان تکیه‌گاه تیرها.
۶. عدم استفاده از خاموت برای بستن میلگردهای قائم.
۷. عدم توجه به توصیه‌های آیین‌نامه در ارتباط با رعایت حداکثر فاصله ۱۲۰ سانتیمتری بین میلگردهای قائم درون دیوارها.
۸. عدم مهار میلگردهای قائم در کلاف‌های افقی در تراز زیر سقف.

د: در مقایسه با تخریب‌های شاید ناشی از عدم رعایت ضوابط آیین‌نامه زلزله و یا عدم اجرای صحیح ساختمان‌ها، لازم است همچنان که در بررسی ساختمان‌های مسکونی روستای حاجی‌آباد (بخش ۲ـ۲) و روستای اسفدن (بخش ۲ـ۳) نتیجه‌گیری شد به مواردی اشاره نمود که به دلیل طراحی درست و اجرای صحیح جزئیات ساختمان، خسارتهای وارده بسیار محدودتر بوده است. در این گونه از ساختمان‌ها دلایلی بشرح زیر سبب پایداری کلی بنا گردیده است:

۱. مصالح مورد استفاده در سازه بنا دارای مقاومت کافی بوده و با کیفیت خوب اجرا شده است.
۲. دقت کافی در اجرای دیواره‌ها و سقف به صورت یک مجموعه یکپارچه جهت مقاومت در برابر نیروهای جانبی (مانند زلزله) بعمل آمده است.
۳. کلاف‌های افقی بتنی (معمولاً به ابعاد ۳۰ × ۴۰ سانتیمتر) در تراز زیر دیوارها و در زیر سقف اجرا شده است.
۴. کلاف‌های قائم بتنی به تعداد مناسب در ساختمان در نظر گرفته شده است.
۵. پی‌های این ساختمان‌ها حتی اگر از نوع شفته آهکی بوده‌اند با کیفیت مناسب اجرا گردیده‌اند.

هـ: نتایج این تحقیق براساس مطالعه رفتار گونه‌های مختلف ساختمان‌های جدیدالاحداث در منطقه قائنات نشان‌دهنده آنست که به‌منظور احتراز از وارد شدن مجدد زیان‌های عظیم انسانی و مالی بر جامعه خصوصاً جمعیت

روستایی کشور ضروری است ملاحظات و نتایج مشروحه ذیل در کلیه ساخت و سازهای کشور خصوصاً بازسازی مناطق زلزله‌زده مورد توجه دقیق قرار گیرند.

۱. اجرای ضوابط آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله (آیین‌نامه ۲۸۰۰) در کلیه ساختمان‌های روستایی (همانند سایر ساختمان‌ها) الزامی گردد.

۲. بر محدودیت استفاده از سیستم‌های ترکیبی در سازه ساختمان‌ها بیش از پیش تأکید گردد.

۳. سطوح بازشدگی دیوارهای باربر در ساختمان‌ها دقیقاً مطابق آیین‌نامه‌های مربوطه کنترل گردد.

۴. دستورالعمل‌های اجرایی لازم توسط سازمانهای دستگاه‌ها اجرایی مسئول در امر ساخت ساختمان‌های مسکونی به منظور رفع مشکلات و نواقص اشاره شده در این مقاله و تحقیقات مشابهی که در این راستا به‌عمل آمده است، تهیه و به نهادها و سازمان‌های مجری ابلاغ گردد.

منابع و مآخذ:

۱. ثقفی، محمدجواد: «آسیب‌های ناشی از اجرای نامناسب در ساختمان‌های خسارت دیده از زلزله، بررسی موردی: منطقه قائنات»، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۷۸، صص ۷۰۴ـ۶۹۱.

۲. ثقفی، محمدجواد: «بررسی آسیب‌های ناشی از اجرای نامناسب در ساختمان‌های خسارت‌دیده از زلزله منطقه قائنات ـ اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶»، مجله هنرهای زیبا، شماره ۴ و ۵، دانشکده هنرهای زیبا ـ دانشگاه تهران، ۱۳۷۸، صص ۷۲ـ۶۲.

۳. خطیب، محمدمهدی: «رابطه بین پهنه برشی و طول قطعات گسلی در گسل زمین‌لرزه‌ای اردکول»، مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، صص ۱۸ـ۱۱.

۴. شکیب، حمزه ـ بیات، حسن: «ارزیابی رفتار سازه‌های منطقه زلزله‌زده قائنات»، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ۱۳۷۶.

۵. فدایی، محمدجواد ـ زراعتی، علیرضا: «بررسی خرابیهای ساختمان‌های بتن مسلح در زلزله‌های اخیر قائن و دُلباف». مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۷۸، صص ۶۹۰ـ۶۸۲.

۶. فرهبد، امیرمنصور ـ یمینی فرد، فرزام: «نگرشی بر زمین‌لرزه ۲۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ اردکول و پس‌لرزه‌های آن». پژوهشنامه مؤسسه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال هفتم، شماره اول، صص ۳۲ـ۲۶.

۷. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: «آیین‌نامه طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله»، استاندارد شماره ۲۸۰۰ از مجموعه آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران، بهمن‌ماه ۱۳۶۶.

۸. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: «زمین‌لرزه ۲۰ اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ زیرکوه قائنات»، ۱۳۷۶.

۹. نیکزاد، خشایار [و دیگران]: «گزارش مقدماتی زمین‌لرزه اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۶ اردکول (قائن ـ بیرجند)»، پژوهشنامه مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال ششم، شماره اول، ۱۳۷۶، صص ۵۳ـ۴۵.