مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها

راهکارها و نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس

تألیف: Thomas Wenk

ترجمه و تدوین: ساسان محاسب

(استاد دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران)

آرش نیری

(دکترای عمران - ژئوتکنیک)

با همکاری: رضا داوودی

کنفدراسیون سوئیس

اداره فدرال برای محیط زیست

بسم الله الرحمن الرحيم

مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها

راهکارها و نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس

تألیف:

Thomas Wenk

ترجمه و تدوین:

ساسان محاسب

(استاد دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران)

آرش نیری

(دکترای عمران ـ ژئوتکنیک)

با همکاری:

رضا داوودی

کنفدراسیون سوئیس

اداره فدرال برای محیط زیست

سرشناسه	:	ونک، توماس Wenk, Thomas
عنوان و نام پدیدآورنده	:	مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها: راهکارها و نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس/ [توماس ونک]، کنفدراسیون سوئیس، اداره فدرال برای محیط زیست؛ ترجمه و تدوین ساسان محاسب، آرش نیری؛ با همکاری رضا داوودی.
مشخصات نشر	:	تهران: تمثیل، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	:	۱۳۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۱ ـ ۲۳ ـ ۲۸۹۰ ـ ۹۶۴ ـ ۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی	:	فیپا.
یادداشت	:	عنوان اصلی: Seismic retrofitting of structures: strategies and collection of examples in Switzerland, 2008.
یادداشت	:	**واژه‌نامه.**
موضوع	:	زلزله ـ ـ سوئیس ـ ـ مهندسی
موضوع	:	ساختمان‌های ضد زلزله ـ ـ سوئیس
موضوع	:	ساختمان‌ها ـ ـ سوئیس ـ ـ مرمت و بازسازی
شناسه افزوده	:	محاسب، ساسان، ۱۳۳۵ ـ ، مترجم.
شناسه افزوده	:	نیری، آرش، ۱۳۵۵ ـ ، مترجم.
شناسه افزوده	:	داودی، رضا، مترجم.
شناسه افزوده	:	سوئیس. اداره فدرال محیط زیست
شناسه افزوده	:	Switzerland. Bundesamt für Umwelt
رده‌بندی کنگره	:	۱۳۹۲ ۷ م ۹ و / TH ۱۰۹۵
رده‌بندی دیویی	:	۶۹۳/۸۵۲
شماره کتاب‌شناسی ملّی	:	۳۲۵۵۰۹۱

ناشر: انتشارات تمثیل

مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها

(راهکارها و نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس)

کنفدراسیون سوئیس

اداره فدرال برای محیط زیست

تألیف: Thomas Wenk

ترجمه و تدوین: ساسان محاسب ـ آرش نیری

امور فنی و هنری: مهناز عزب‌دفتری

نوبت چاپ: اول، ۱۳۹۲

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

شابک: ۱ ـ ۲۳ ـ ۲۸۹۰ ـ ۹۶۴ ـ ۹۷۸

قیمت: ۲۶۰۰۰ تومان

حق چاپ برای صاحب اثر محفوظ است.

تلفن تماس: ۶۶۹۶۱۵۹۶ ـ ۰۹۱۲۳۱۹۱۱۵۲ ـ ۰۹۳۹۳۱۹۱۱۵۲

مشخصات چاپ لاتین

ویراستار

دفتر فدرال محیط‌زیست سوئیس (FOEN).

FOEN دفتر اداری از بخش فدرال اداره‌های محیط‌زیست، حمل و نقل، انرژی و ارتباطات است (ETEC).

نویسنده

توماس وِنک (Thomas Wenk)

مشاور ارشد FOEN

بلازی دوورنی (Blaise Duvernay). سرپرست هماهنگی در دفتر فدرال پهنه‌بندی لرزه‌ای.

مشخصات ارجاع کتاب

توماس وِنک ـ ۲۰۰۸: مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها. راهکارها و نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس. گزارش تحقیقاتی شماره ۰۸۳۲ ـ اداره فدرال محیط‌زیست ـ برن ـ ۸۴ صفحه.

مترجم

ژوزفین، ا. برانکو، ویلمت، ایلی‌نویز ۶۰۰۹۱. آمریکا.

آدرس نسخه الکترونیکی

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0832-e

(نسخه الکترونیکی بدون امکان چاپ در دسترس است)

فهرست

چکیده

پیشگفتار

مقدمه

فصل اول رفتار سازه‌های موجود

۱ـ۱ ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در سوئیس ۱

۱ـ۲ دلایل ارزیابی ایمنی لرزه‌ای ۳

۱ـ۲ـ۱ طبقه‌بندی کاربری و سازه‌ای ساختمان ۳

۱ـ۲ـ۲ اولویت‌بندی ۳

۱ـ۲ـ۳ پتانسیل بازسازی و بهسازی هم‌زمان ۴

۱ـ۳ ارزیابی ایمنی لرزه‌ای مطابق پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 ..... ۵

۱ـ۴ عوامل مؤثر در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ۶

فصل دوم راهکارهای مقاوم‌سازی لرزه‌ای

۲ـ۱ راهکارهای توصیه‌شده ۹

فصل سوم نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس

۳ـ۱ اداره پلیس در شهر سیون ۱۷

۳ـ۲ ایستگاه آتش‌نشانی شهر ویسپ ۲۱

۳ـ۳ ایستگاه آتش‌نشانی شهر بازل ۲۴

۳ـ۴ اتاق برق زیرزمینی در شهر بازل ۲۸

۳ـ۵ ساختمان مسکونی ـ تجاری در شهر سیون ۳۱

۳ـ۶ مدرسه در شهر مونتی ۳۵

۳ـ۷ آموزشگاه عالی بازرگانی در شهر مونتی ۳۹

۳ـ۸ ساختمان شهرداری در سنت‌ماریس ۴۲

۳ـ۹ سالن چندمنظوره در اُبِردورف ۴۶

۳ـ۱۰ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در فریبورگ ۴۹

۳ـ۱۱ ساختمان اداره دولتی برن ۵۳
۳ـ۱۲ دبیرستان در شهر نویفلد برن ۵۷
۳ـ۱۳ پردیس آموزشی در استرموندیگن برن ۶۰
۳ـ۱۴ بیمارستان کودکان در شهر آرائو ۶۳
۳ـ۱۵ تالار سخنرانی HPH در ETH زوریخ ۶۶
۳ـ۱۶ دبیرستان در شهر زوریخ ۷۰
۳ـ۱۷ ایستگاه رادیویی شهر زوریخ ۷۳
۳ـ۱۸ ساختمان اداری EMPA ۷۵
۳ـ۱۹ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در وینترتور ۷۹
۳ـ۲۰ مدرسه شبانه‌روزی در گوسا ۸۳
۳ـ۲۱ آپارتمان مسکونی در کرانس ـ مونتانا ۸۶
۳ـ۲۲ هتل شهر بوسینی ۹۰
۳ـ۲۳ پل بزرگراهی خیابان سیمیلون ۹۳
۳ـ۲۴ مخزن گاز مایع در ویسپ ۹۶
۳ـ۲۵ ساختمان مسکونی در کریسرن ۱۰۰
۳ـ۲۶ کتابخانه مؤسسه ETH زوریخ ۱۰۲
۳ـ۲۷ برج اداری SIA در زوریخ ۱۰۳

پیوست‌ها

پیوست الف ۱۰۹
پیوست ب ۱۱۵

واژه‌نامه ۱۱۷
منابع ۱۱۹

چکیده

این نوشتار زمینه لازم برای بررسی مشکلات مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها را در جزییات و مسائل فنی فراهم می‌نماید. ارائه ۲۴ مثال از پروژه‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای اجراشده در کشور سوئیس، تفاوت‌های ممکن بین راهکارهای مختلف را نشان داده و پیشنهادات و معیارهای تصمیم‌گیری در مواجهه با مسائل پیچیده مربوط به‌تأمین ایمنی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود را بیان می‌کند. این مجموعه در نگاه اول مورد استفاده مهندسین سازه می‌باشد، لیکن معماران، سازندگان و مالکان ساختمان‌ها و خانه‌های مسکونی نیز می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در مورد مدیریت خطرپذیری زلزله برای ساختمان‌های موجود را از محتوی فنی این کتاب دریافت نمایند.

کلمات کلیدی

زلزله، پهنه‌بندی، سازه‌های موجود، مقاوم‌سازی لرزه‌ای، مجموعه مثال‌ها، راهکار، سوئیس.

پیشگفتار

تا سال ۲۰۰۴ در کشور سوئیس نه‌تنها معیار و سابقه اجرایی برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود وجود نداشت، بلکه دیدگاهی نسبت به‌هزینه‌های نسبی این عملیات نیز در دسترس نبود. این شکاف با حمایت «مرکز هماهنگی پهنه‌بندی زلزله» که زیرمجموعه‌ای از اداره فدرال محیط زیست کشور سوئیس (FOEN) [1] می‌باشد و با انتشار اولین نسخه از پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 با عنوان «ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سازه‌های موجود در مقابل زلزله»، کاهش یافت. از زمان انتشار این پیش‌نویس استاندارد، توجه به‌موضوع ایمنی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود به‌وضوح افزایش یافته است.

از ماه دسامبر سال ۲۰۰۰ که برنامه دولت سوئیس برای پهنه‌بندی لرزه‌ای این کشور آغاز گردید، ارزیابی سازه‌های موجود در بخش‌های مختلف دولت نیز توسط بودجه دولتی فعال شد. در مورد ساختمان‌های غیرایمن در برابر زلزله، بررسی‌ها به‌طور خودکار بر مبنای ملاحظات معقول و تناسب شرایط اقتصادی صورت می‌گرفت. در سطح بخشداری‌ها، ارزیابی و بررسی‌های مقدماتی ایمنی لرزه‌ای در مورد اکثر ساختمان‌های دولتی و سازه‌های مهندسی انجام شد. دولت مرکزی و بیش از نیمی از بخشداری‌ها، ارزیابی‌های ایمنی لرزه‌ای را در مورد ساختمان‌های حوزه مسئولیت خود به‌طور کامل انجام دادند که اغلب نیز با هدف بهسازی و عملیات تعمیری بوده است.

در حال حاضر تعداد بسیار کمی از استان‌ها و بخش‌ها هستند که قوانین و معیارهای تعیین شده در طراحی مقاوم لرزه‌ای را در اجرای ساختمان‌های شخصی رعایت نمی‌کنند. در اکثر موارد مسئولیت‌پذیری لازم نزد مالکان ساختمان‌های خصوصی وجود داشته و با برنامه‌های ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها موافقت می‌کنند. هرچند در مقایسه با ساختمان‌های عمومی، فعالیت مقاوم‌سازی ساختمان‌های خصوصی هنوز کمی کُند است.

با پیشرفت برنامه پهنه‌بندی لرزه‌ای، دولت فدرال برمبنای نقش اصلی و محرک خود، حمایت از استان‌ها و بخش‌ها، پیمانکاران حرفه‌ای ساختمان، شرکت‌های بیمه، و همچنین

1. Federal Office for The Environment

مجموعه‌های خصوصی را با روش‌های مشخص بر عهده گرفت. اداره فدرال محـیط زیـست سوئیس (FOEN) تعداد زیادی از پروژه‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای را در کشور سوئیس تجربه نموده که بخشی از آنها در این کتاب ارائه شده است. مخاطب اصلی این مجموعه معمـاران، مهندسین سازه، پیمانکاران و کارفرمایان هستند.

آندره اس گوتز
معاون مدیریت
اداره فدرال محیط زیست (FOEN)

مقدمه

این نوشتار در اصل به‌عنوان یک مطلب کاربردی، مهندسان سازه را خطاب قرار می‌دهد. راهکارهای ممکن برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و همچنین روش‌ها و تصمیم‌گیری‌های کمکی در راستای بهینه‌سازی مسئله مورد نظر، از طریق تشریح مثال‌های آموزنده و اجرایی طرح‌های مقاوم‌سازی در کشور سوئیس بیان شده‌اند. معماران، مالکان ساختمان‌های بزرگ و صاحبان خانه‌های کوچک می‌توانند به اطلاعات لازم در مورد راهکارهای مدیریت خطر زلزله، به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی مهم در کشور سوئیس، در متن حاضر دست یابند.

در فصل اول تقسیم‌بندی رفتار سازه‌های موجود و درجه اهمیت آنها، موضوعات مرتبط با ایمنی لرزه‌ای سازه‌های موجود، دلایل ارزیابی سازه‌ها و مبانی تصمیم‌گیری بر پایه خطرپذیری زلزله برای مقاوم‌سازی منطبق بر محتوی پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 با عنوان «ارزیابی ساختمان‌های موجود در برابر آثار زلزله»، بیان شده است.

فصل دوم اختصاص به معرفی مختصر راهکارهای مختلف مقاوم‌سازی لرزه‌ای دارد. در این فصل راهکارهای مناسب برای بهبود ایمنی ساختمان‌های موجود در برابر آثار زلزله، متناسب با شرایط محیطی و کاربری مختلف، تشریح شده‌اند.

فصل سوم و اصلی کتاب شامل مجموعه‌ای از ۲۴ ساختمان و سازه موجود در کشور سوئیس است که در سال‌های اخیر با انجام بازرسی‌ها و ارزیابی‌های فنی، مقام‌سازی لرزه‌ای شده‌اند. هر سازه یا مثال با معرفی کوتاهی از سازه در قالب متن، عکس و نقشه و ارائه کلیات طرح مفهومی و اجرایی عملیات مقاوم‌سازی آغاز شده است. در ادامه ضعف سازه‌ای در وضعیت اولیه در قبال بارهای لرزه‌ای، طرح مقاوم‌سازی و سایر نکات برجسته و ضروری تشریح شده‌اند. در انتها مجموعه‌ای از اطلاعات تکمیلی نظیر مدت عملیات اجرایی، کاربری ساختمان، ارزش ساختمان، درجه اهمیت سازه، موقعیت در پهنه‌بندی لرزه‌ای، نوع زمین، ضریب خدمت‌پذیری و هزینه عملیات مقاوم‌سازی نیز ارائه شده‌اند.

در این مجموعه مثال‌ها، ساختمان‌های مختلف در حوزه وسیعی از کاربری، نوع خاک،

پهنه‌بندی خطر زلزله و طرح مقاوم‌سازی انتخاب شده‌اند. علاوه بـر سـازه‌هـای سـاختمانی، مثال‌هایی از پل بزرگراهی و منبع ذخیره گاز مایع نیز انتخاب شده‌اند تا دیدگاه لازم از طـرح مقاوم‌سازی سازه‌های مختلف ارائه شده باشد. سه ساختمانی که در مثال‌های انتهایی معرفی شده‌اند، کفایت ضوابط ایمنی لرزه‌ای را تأمین می‌کنند، ولی به‌عنوان نمونه‌هـایی از ارزیـابی ساختمان‌ها در کشور سوئیس برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ارائه شده‌اند.

اطلاعـات و موضـوعات خاصـی نظیـر تاریخچـه توسـعه دسـتورالعمل لـرزه‌ای در استانداردها و هزینه عملیات مقاوم‌سازی بعضی از مثال‌ها در پیوست‌های انتهایی خلاصـه و ارائه شده‌اند.

مقدمه مترجم

در حال حاضر اولویت ویژه‌ای برای بازسازی و نوسازی زیربناهای مختلف در سطح کشور مقرر شده است. در این راستا، حرکت‌های علمی و عملی ارزشمندی در زمینه تدوین و تألیف کتب و نشریات، گسترش کاربرد مصالح نوین و ابداع شیوه‌های مختلف اجرایی در حال انجام است. لذا پرداختن کارشناسانه به این مقوله، از مهمترین وظایف قشر محقق و دانشگاهی کشور خواهد بود.

با توجه به شرایط لرزه‌خیزی کشور ایران، ارتقاء دانش و تجربیات علمی و اجرایی در زمینه بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها و ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تمرکز منابع موجود در قالب ترجمه و تألیف که به‌مباحث بهسازی و مقاوم‌سازی می‌پردازند، بر مبانی محاسبات و روش‌های تحلیل و طراحی می‌باشد، درحالی‌که آگاهی از تجربیات اجرایی به‌دست‌آمده در شرایط مختلف اجرایی و اقتصادی، می‌تواند اهمیت زیادی در ارائه روش‌های مؤثر و بهینه داشته باشد. به‌عنوان مثال در روند مقاوم‌سازی هتل پارسیان آزادی تهران که توسط اینجانب (ساسان محاسب) انجام شده است، در مدل‌سازی میراگرها نتایج بسیار خوبی به‌دست آمد ولی در اجرا و نصب آنها با مشکلات اجرایی متعددی نظیر اتصال میراگر به شاهتیرها، حمل و جابه‌جایی میراگرها، کنترل جوش اتصالات به ستون‌ها و تقویت ستون‌ها و شاهتیرها مواجه بودیم که منجر به تغییر چندباره طرح گردید.

با توجه به تجربیات مختلف از عملیات اجرایی در ایران و در سطح بین‌المللی، لازم دیده شد کتاب حاضر که نتایج بیش از یک دهه تجربه اجرایی اینجانب و همکاران مهندسی در سوئیس، به‌ویژه پروفسور Wenk می‌باشد، به فارسی ترجمه شده و در اختیار جامعه مهندسی قرار گیرد. در این کتاب ۲۴ مثال از پروژه‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای که در شرایط مختلف جغرافیایی، لرزه‌خیزی، بهره‌برداری و اقتصادی در کشور سوئیس اجرا شده‌اند، با ذکر جزییات مشخصات طرح و روش انتخابی ارائه شده است. تنوع جزییات معماری، مصالح مورد استفاده، چالش‌های بهره‌برداری، روش‌های اجرایی و هزینه عملیات مقاوم‌سازی از نقاط قوت مجموعه حاضر بوده و آن‌را مهندسین عمران، معماران، صاحب‌کاران و مدیران اجرایی در موضوع بهسازی و مقاوم‌سازی لرزه‌ای سازه‌ها و ساختمان‌های مختلف تشکیل می‌دهند. امید است چنین مجموعه‌هایی به‌عنوان یک

راهنمای مناسب برای کلیه افراد فعال در زمینه عملیات مقاوم‌سازی سازه‌ها مفیـد و راهگـشا باشد.

در پایان لازم می‌دانیم از زحمات سرکار خانم مهناز عزب‌دفتری و همکاران ایشان که آماده‌سازی و امور فنی و هنری کتاب را بر عهده داشته و همچنین کتاب را با دقت و کیفیت بالا به چاپ رسانیده‌اند قدردانی نماییم. خواهشمند است درصـورت وجـود هرگونـه ابهـام در رابطه با محتوای کتاب یا وجود ایرادات احتمالی، با اینجانب (ساسان محاسب ـ آرش نیـری) مکاتبه نمایید.

مهرماه ۱۳۹۲

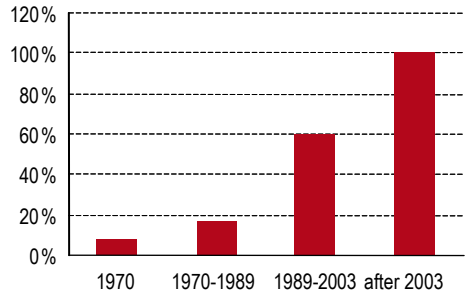
ساسان محاسب
smteam@gmx.ch
آرش نیری

فصل اول رفتار سازه‌های موجود

در چند سال اخیر ضوابط لرزه‌ای در استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی به وضوح پیچیده و سخت‌گیرانه شده‌اند. به دلیل فراگیر بودن بی‌توجهی به این نوع ضوابط، مقاومت لرزه‌ای نه تنها برای ساختمان‌های قدیمی، بلکه برای سازه‌های جدید نیز مورد سئوال است. در این راستا، نیاز به توجه بیشتر هم در سطح ابنیه عمومی و هم در موارد خاص وجود دارد. به منظور حصول اطمینان از ضرورت مقاوم‌سازی، لازم است کفایت ساختمان‌های موجود برای مقاومت در مقابل آثار زلزله ارزیابی گردد.

۱ـ۱ ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در سوئیس

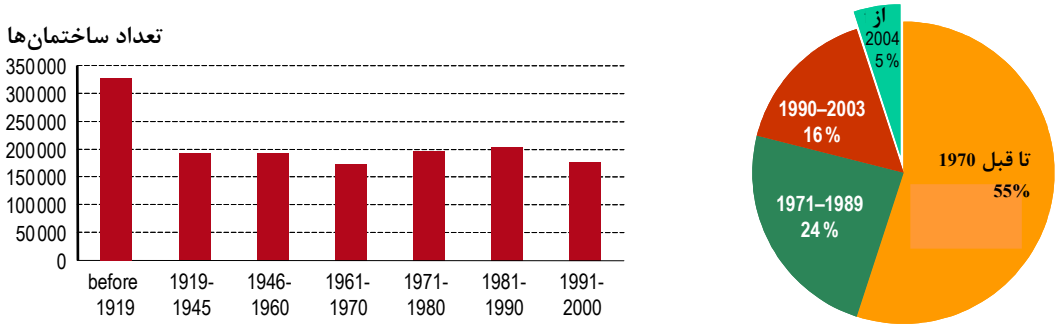
پس از انتشار اولین ویرایش دستورالعمل لرزه‌ای در استانداردهای ساختمانی توسط مؤسسه مهندسان و معماران سوئیس (SIA) (استاندارد SIA160 در سال ۱۹۷۰)، ضوابط طراحی در استانداردهای بعدی در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۳ بسیار سخت‌گیرانه‌تر شدند. پیشینه و علت این تغییرات، رشد دانش مهندسی زلزله و لرزه زمین ساخت بوده است. شکل ۱ نمونه‌ای از افزایش نیروی جانبی محاسباتی ناشی از عملکرد زلزله و باد را از سال ۱۹۷۰ برای یک ساختمان ۴ طبقه مسکونی با مصالح بنایی نشان می‌دهد. جزییات بیشتر از تاریخچه توسعه دستورالعمل لرزه‌ای ساختمان‌ها در پیوست (الف ـ ۱) ارائه شده است.



شکل ۱ ـ ۱ افزایش نیروی جانبی محاسباتی باد یا زلزله برای ساختمان‌های مسکونی معمولی

مقایسه اندازه نسبی نیروی جانبی وارد بر یک ساختمان ۴ طبقه مسکونی بنایی واقع در ناحیه مرکزی کشور (ناحیه لرزه‌ای Z1). تا قبل از ۱۹۷۰ نیروی جانبی طراحی ناشی از فشار باد و بعد از سال ۱۹۷۰، ناشی از اثر زلزله بوده است.

از سال ۱۹۷۰ به‌بعد، تعدادی از ساختمان‌ها در کشور سوئیس به طور نسبی و سبک نوسازی شده‌اند. شکل ۱ ـ ۲ توزیع ساختمان‌های موجود را براساس ویرایش‌های مختلف استاندارد لرزه‌ای و بر پایه اطلاعات اداره فدرال جمعیت و مسکن سوئیس از سال ۲۰۰۰ به بعد نشان می‌دهد (BFS-2004). حدود ۵۵ درصد کل ساختمان‌ها قبل از ارائه اولین دستورالعمل لرزه‌ای در استاندارد SIA 160 (۱۹۷۰) طراحی و اجرا شده‌اند. ۲۲ درصد ساختمان‌ها حد فاصل سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۹، ۲۱ درصد ساختمان‌ها از سال ۱۹۹۰ به بعد براساس استانداردهای جدید لرزه‌ای و فقط ۳ درصد کل ساختمان‌ها منطبق بر ویرایش جدید استاندارد لرزه‌ای در سال ۲۰۰۳ طراحی و اجرا شده‌اند. با وجود این، به دلیل تخمین دقت پایین از خطرپذیری (ریسک) زلزله و عدم وجود تعهدهای قانونی نزد سازندگان، هنوز از دستورالعمل‌های لرزه‌ای در نظام اجرایی به طور کامل تبعیت نمی‌شود.



شکل ۱ ـ ۲ توزیع تعداد ساختمان‌ها در سوئیس در سال‌های مختلف

توزیع تعداد ساختمان‌ها براساس دوره اجرا (چپ) و بعد از ویرایش استاندارد SIA (راست)

از آنجا که ساختمان‌های قدیمی‌تر برای عملکرد لرزه‌ای طراحی نشده‌اند، نیاز به حفاظت اساسی‌تری در مقابل آثار ناشی از زلزله خواهند داشت. هرچند باید اذعان داشت که بسیاری از ساختمان‌های قدیمی و حتی ساختمان‌های عمومی با ملاحظات اجرایی معمول، قادر به اقناع ضوابط لرزه‌ای در مقررات جدید نمی‌باشند. در کشور سوئیس مهمترین مسئله‌ای که به تناوب نیز مشاهده می‌شود، ضعف سازه‌ای ساختمان‌ها و عواقب نامطلوب آن از دیدگاه رفتار لرزه‌ای می‌باشد (شکل ۱ ـ ۳ را نیز ببینید). برخی از ضعف‌ها و ایرادات سازه‌ای که منجر به‌رفتار نامناسب لرزه‌ای می‌گردد به‌شرح زیر است:

طبقه نرم

عموماً بادبندهای قوی و دیوارهای مقاوم در برابر بارهای جانبی در طبقات پایین ساختمان حذف شده‌اند. در این حالت ستون‌های باقیمانده قادر به تحمل اثرات زلزله نمی‌باشند.

بادبندی نامتقارن

آرایش نامتقارن سیستم بادبندی در پلان ساختمان باعث ایجاد پیچش اضافه‌ای در هنگام وقوع زلزله می‌گردد. این عامل باعث گسیختگی زودهنگام ساختمان خواهد شد.

اجرای ساختمان بنایی بدون دیوارهای کلاف

استفاده از مصالح بنایی در اجرای ساختمان‌های مسکونی به دلیل سهولت استفاده و مشخصات فیزیکی مطلوب، بسیار متداول است. هرچند به دلیل ضعف مقاومت کششی و ترد بودن رفتار آجرها، کاربرد مصالح بنایی غیرمسلح در مناطق زلزله‌خیز بدون استفاده از ستون و دیوار کلاف مناسب نیست.

ساختمان از نوع بنایی غیرمسلح
(مثال ۷: مدرسه‌ای در شهر مونتی)

ساختمانی با بادبندی نامتقارن
(مثال ۱۵: سالن درس در ETH زوریخ)

ساختمان با طبقه همکف نرم
(مثال ۱۵: ساختمان مسکونی و فروشگاه در شهر سیون)

شکل ۱ ـ ۳ انواع ضعف‌های سازه‌ای در قبال نیروهای زلزله

۱ـ۲ دلایل ارزیابی ایمنی لرزه‌ای

با توجه به سخت‌گیرانه شدن دستورالعمل‌ها و مقررات لرزه‌ای در استانداردهای ساختمانی SIA در چند دهه اخیر، ساختمان‌های موجود علیرغم نوساز بودن یا نوسازی شدن، باید مورد ارزیابی قرار گیرند. با توجه به تعداد زیاد ساختمان‌ها، توصیه می‌شود برنامه مشخصی برای ارزیابی خطرپذیری پایه ساختمان‌ها وجود داشته باشد.

۱ـ۲ـ۱ طبقه‌بندی کاربری و سازه‌ای ساختمان

بر پایه ضوابط استاندارد SIA 261 با عنوان «نیروی وارد بر سازه‌ها» (SIA 261-2003)، ساختمان‌ها به ۳ رده اهمیت (IC) تقسیم می‌شوند. درجه حفاظت از ساختمان و ایمنی لرزه‌ای مورد نیاز، متناسب با این تقسیم‌بندی تعیین می‌گردد. ضوابط مربوط به انتخاب رده هر ساختمان با تعداد ساکنین متوسط، بر پایه پتانسیل خرابی ساختمان، میزان خطرپذیری و اهمیت سازه در مدیریت بحران بلافاصله بعد از وقوع زلزله تعیین می‌شود. ساختمان‌های مسکونی منظم و ساختمان‌های تجاری در رده IC-I قرار می‌گیرند. ساختمان‌ها با تعداد ساکنین بیشتر در رده IC-II و شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌های مهم شهری نظیر ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پارکینگ آمبولانس‌ها و بیمارستان‌های ویژه در بالاترین طبقه‌بندی و رده IC-III قرار می‌گیرند. شکل ۱ـ۴ مثال‌هایی از هر سه طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

رده اهمیت I
(مثال ۲۵: خانه مسکونی کریسن)

رده اهمیت II
(مثال ۱۳: دبیرستان استروموندیگن)

رده اهمیت III
(مثال ۳: ایستگاه آتش‌نشانی بازل)

شکل ۱ ـ ۴ مثال‌هایی از طبقه‌بندی اهمیت ساختمان‌ها براساس استاندارد SIA 261

۱ـ۲ـ۲ اولویت‌بندی

سازه‌های مهم یعنی رده IC-II و به‌خصوص رده IC-III باید به‌صورت ساماندهی‌شده در اولویت ارزیابی قرار گرفته و خارج از فرآیندهای طولانی و عمومی برنامه نگهداری و ارزیابی، در صورت نیاز مقاوم‌سازی شوند. در این حالت سازه‌هایی که پتانسیل خطرپذیری بیشتری دارند مورد توجه قرار گرفته و عملیات ارزیابی و مقاوم‌سازی در مورد آنها اعمال می‌گردد. بدین منظور اجرای برنامه‌ای با روند گام به‌گام و با افزایش دقت و عمق ارزیابی‌ها برای چنین ساختمان‌هایی پیشنهاد می‌گردد. محدود نمودن معیارها، مسیر را برای شناسایی ساختمان‌های مهم و بحرانی هموار نموده و در عین حال امکان تهیه سیاهه ساختمان‌های عمومی را نیز فراهم می‌نماید. پس

از مرحلهٔ شناسایی، ضرورت و گسترش عملیات ارزیابی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های مهم باید براساس معیارهای خطرپذیری (استانداردهای BWG-2005 و BWG-2006) برنامه‌ریزی گردد. در این نوع برنامه‌های ارزیابی ساماندهی‌شده، توصیه می‌گردد ساختمان در مناطق با خطر زلزله خیلی شدید در بالاترین اولویت قرار گیرند (نظیر نواحی Z2، Z3a و Z3b طبق استاندارد SIA 261) (همچنین پیوست الف را ببینید).

۱ـ۲ـ۳ پتانسیل بازسازی و بهسازی هم‌زمان

در صورت امکان ارزیابی‌ها و اندازه‌گیری‌ها برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای باید با بررسی امکان بازسازی مجدد یا نوسازی ساختمان به‌جهت صرفه‌جویی در زمان و انرژی انجام گرفته و تا حد امکان هزینه عملیات مقاوم‌سازی کاهش یابد. وقتی برای بازسازی مجدد یا بهسازی یک ساختمان برنامه‌ریزی می‌شود، ارزیابی ایمنی لرزه‌ای ساختمان نیز باید در این برنامه گنجانده شود تا معیارهای ضروری در برنامه و فرآیند ارزیابی‌ها لحاظ گردد.

۱ـ۳ ارزیابی ایمنی لرزه‌ای مطابق پیش‌نویس استاندارد SIA 2018

در صورتی‌که ساختمانی مقررات و ملاحظات لرزه‌ای استانداردهای ساختمانی SIA را اقناع نماید، در مرحله بعدی براساس معیارهای پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 (2004) با عنوان «ارزیابی ساختمان‌های موجود برای مقابله با زلزله» مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی‌که ساختمان موجود مقررات و ضوابط لرزه‌ای استانداردهای جدید را به‌طور کامل تأمین ننماید، بر پایه روند خودکار مورد ارزیابی‌ها و سنجش‌ها جهت مقاوم‌سازی قرار نمی‌گیرد. در صورتی‌که راه‌حل‌های مختلف در خصوص کاهش خطرپذیری ساختمان بررسی شدند، معمولاً هزینه روش‌های مختلف، تعیین‌کننده راه حل نهایی خواهد بود. در این راستا، پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 (2004) حاوی مقررات و ضوابط ارزیابی برای ایمنی لرزه‌ای ساختمان‌ها بر پایه اصول خطرپذیری می‌باشد.

در اولین قدم از ارزیابی‌ها، یعنی بازرسی و برداشت داده‌ها، ضریب خدمت‌پذیری α_{eff} مهم‌ترین شاخص به‌دست آمده می‌باشد. این عدد شاخصی است تا مشخص نماید چه سطحی از ضوابط در روند طرح لرزه‌ای یک ساختمان جدید طبق معیارهای استاندارد SIA باید لحاظ گردد. بدین منظور، مقدار مقاومت در سطح طراحی، R_d یا ظرفیت تغییرشکل در سطح طراحی، بر نیروی داخلی ناشی از عملکرد زلزله در سطح طراحی، E_d، تقسیم می‌گردد.

$$\alpha_{eff} = \frac{R_d}{E_d}$$

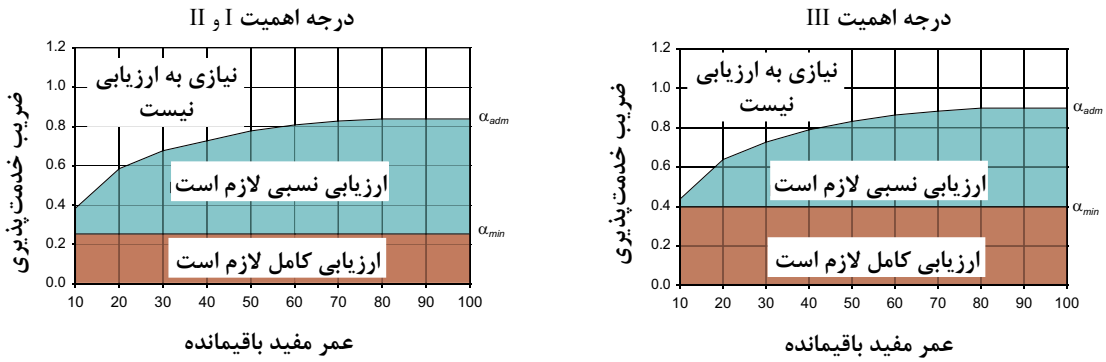
وقتی مقدار ضریب خدمت‌پذیری برای ساختمان موجود برابر یا بزرگتر از یک باشد (100% یا $\alpha_{eff} > 1$)، یعنی ضوابط طراحی در اجرای آن به طور کامل تأمین شده‌اند. در این شرایط مشکل خاصی وجود نداشته و ساختمان در وضعیت موجود خود، ایمنی کافی در رفتار لرزه‌ای را فراهم می‌نماید.

زمانی‌که مقدار ضریب خدمت‌پذیری α_{eff} برای ساختمان‌های موجود کوچکتر از یک باشد، بدین معنی است که ضوابط طراحی در اجرای ساختمان‌ها به‌طور کامل رعایت نشده است. دراین حالت ضرورت ارزیابی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها بر پایه اصول خطرپذیری و معیارهای مرتبط با آن که در بخش ۱ ـ ۴ تشریح شده‌اند، وجود خواهد داشت. لازم به‌ذکر است که کمترین مقدار ضریب خدمت‌پذیری به‌دست‌آمده از ارزیابی اعضای مختلف ساختمان، به عنوان مقدار قطعی ضریب α_{eff} در بررسی ایمنی لرزه‌ای منظور می‌گردد.

۴ـ۱ عوامل مؤثر در مقاوم‌سازی لرزه‌ای

اصولاً ضوابط طراحی مورد استفاده برای ساختمان‌های جدید، باید در مورد ساختمان‌های موجود نیز اقناع گردند، بدین معنا که ضریب خدمت‌پذیری α_{eff} برای آنها باید بزرگتر از یک باشد. در صورتی‌که ضروریات ارزیابی لرزه‌ای و تأمین ضوابط مربوطه منجر به‌پیش‌بینی هزینه غیرمتناسب برای مقاوم‌سازی گردد، پیش‌نویس استاندارد SIA2014(2004) ارزیابی‌ها و ضوابط را به‌گونه‌ای محدود می‌نماید تا هزینه‌ها در حد مناسب و منطقی باقی بمانند. در زمینه ارزیابی ساختمان‌های موجود، عمر مفید باقیمانده به صورت یک دوره زمانی بر پایه ایمنی تضمین‌شده سازه‌ای و خدمت‌دهی ساختمان تعریف می‌شود تا در ملاحظات بهره‌برداری و اقتصادی مدنظر باشد. برای ساختمان‌های متعارف، این زمان بین ۲۰ تا ۵۰ سال متغیر است. معمولاً در پایان عمر مفید باقیمانده، انجام ارزیابی‌های بیشتر نسبت به شرایط قبل از آن، ضروری است.

سه مثالی که در ادامه آمده است، ضرورت ارزیابی مقاوم‌سازی لرزه‌ای را متناسب با مقدار سه عامل ضریب خدمت‌پذیری، α_{eff} ، درجه اهمیت سازه و عمر مفید باقیمانده فرض شده، تشریح می‌نماید (شکل ۱ ـ ۵).



شکل ۱ ـ ۵ ارزیابی‌های توصیه شده طبق پیش‌نویس استاندارد SIA 2018

ضرورت ارزیابی برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان با رده اهمیت I و II (شکل چپ) و رده III (شکل راست) تابعی از ضریب خدمت‌پذیری α_{eff} و عمر مفید باقیمانده ساختمان طبق SIA 2018.

۱ ـ در صورتی‌که ضریب خدمت‌پذیری برای ساختمانی با درجه اهمیت I و II به مقدار کمتر از حد آستانه $\alpha_{min} = 0.25$ برسد، میزان خطرپذیری این ساختمان در درازمدت قابل قبول نبوده و انجام مقاوم‌سازی لرزه‌ای، مشروط بر حفظ هزینه‌ها در حد منطقی، ضروری است. در این راستا صرفه‌جویی در هزینه‌ها، که اغلب معادل ۱۰۰ میلیون فرانک سوئیس به ازای نجات هر نفر می‌باشد، در حد منطقی قرار دارد. در صورتی که تأمین خطرپذیری قابل قبول با حفظ هزینه‌های منطقی امکان‌پذیر نباشد، میزان خطرپذیری با ارزیابی عملکردی محدود می‌گردد. مقرر شده است حداقل مقدار ضریب خدمت‌پذیری برای ساختمان‌های با رده اهمیت III بزرگتر از حد آستانه $\alpha_{adm} = 0.4$ باشد. این محدودیت، تضمینی بر حداقل قابلیت بهره‌برداری و عملکرد ساختمان در پی بروز حادثه یا فاجعه است.

۲ ـ در صورتی که مقدار ضریب خدمت‌پذیری حدفاصل دو حد آستانه α_{min} و α_{adm} قرار گیرد، میزان خطرپذیری برای ساکنین با انجام مقاوم‌سازی لرزه‌ای کاهش یافته، در حالی‌که هزینه‌های اجرایی نیز در حد منطقی و معقول کنترل خواهند شد.

۳ ـ در صورتی که مقدار ضریب α_{eff} بیش از حد آستانه α_{adm} به‌دست آید، وضعیت موجود قابل قبول خواهد بود.

متناسب و معقول بودن ارزیابی‌ها برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای طبق ضوابط پیش‌نویس استاندارد SIA 2018(2004)، بر پایه برقراری تعادل بین هزینه و سود (منفعت) عملیات و سطح ایمنی مورد نیاز، قضاوت می‌گردد. هزینه‌های مورد نظر، هزینه عملیات اجرایی جهت افزایش ایمنی در مقابل زلزله هستند که تحت عنوان هزینه حفظ حیات شناخته می‌شوند. منفعت مورد نظر، در

واقع کاهش خطرپذیری در قالب ممانعت از مجروح یا کشته شدن ساکنین یک ساختمان تلقی می‌گردد. هزینه منطقی تا ۱۰ میلیون فرانک سوئیس به ازای نجات هر نفر و هزینه معقول تا ۱۰۰ میلیون فرانک سوئیس به ازای نجات هر نفر تعریف می‌گردد. مرز بین منطقی و معقول بودن هزینه‌ها بر پایه یک میزان خطرپذیری مشخص تعریف می‌شود. این خطرپذیری احتمال کشته شدن شخصی صرفاً در اثر وقوع زلزله است که در طول روز و شب در خانه خود اقامت دارد. این خطر خاص در شرایطی قابل قبول است که احتمال آن از $۱۰^{-۵}$ در هر سال فراتر نرود که متناظر موردی با ضریب خدمت‌پذیری α_{eff} بزرگتر از ۰/۲۵ است.

محاسبه کاهش خطرپذیری بر پایه افزایش ضریب خدمت‌پذیری ناشی از مقاوم‌سازی و تعداد ساکنین ساختمان انجام می‌شود. تعداد ساکنین ساختمان میانگین تعداد افرادی است که در طول ۱ سال در ساختمان اقامت دارند. در اغلب شرایط هزینه‌های مقاوم‌سازی در محدوده منطقی و معقول قرار دارند، لذا گزینه‌ای که بیشترین ضریب خدمت‌پذیری را به‌دست دهد، باید برای اجرا انتخاب گردد. توضیحات مبسوط ارزیابی ایمنی لرزه‌ای بر پایه خطرپذیری و منطبق با ضوابط پیش‌نویس استاندارد SIA 2018(2004)، در استانداردهای SIA DO211(2005) و استاندارد BWG 2005 ارائه شده است. کیفیت خدمت‌پذیری سازه SIA 2018 و سایر دستورالعمل‌ها، در استانداردهای سازه‌ای SIA برای ساختمان‌ها و ابنیه سازمانی دولت فدرال و به دستور مستقیم اداره دارایی (بودجه) (EFD 2008) تعیین شده است. این در حالی است که سایر مجریان و کارفرمایان شاخص، به تبعیت از این دستورات و مقررات توصیه شده‌اند.

فصل دوم راهکارهای مقاوم‌سازی لرزه‌ای

هدف از مقاوم‌سازی لرزه‌ای بهبود رفتار سازه‌ها در قبال آثار زلزله است که این مهم می‌تواند با به‌کارگیری راهکارهای اجرایی مختلف حاصل شود. انتخاب راهکار بهینه جهت مقاوم‌سازی، در گرو شناخت درست رفتار دینامیکی سازه‌های مهندسی و انطباق آن با کاربری سازه در آینده است.

مقاوم‌سازی سازه در برابر آثار دینامیکی زلزله برخلاف روند بهسازی سازه‌ها در قبال بارهای استاتیکی، نیازمند رعایت مشخصه‌های ویژه‌ای است. مقاوم‌سازی در شرایط بهینه باید قادر به‌هماهنگی و انطباق بین ترکیبی از سه مشخصه سازه‌ای مهم شامل *سختی*، *مقاومت نهایی* و *ظرفیت تغییرشکل (شکل‌پذیری)* باشد. روش‌های مقاوم‌سازی که تنها بر ارتقای یک مشخصه تمرکز نموده و به‌نتایج نامطلوب عدم توجه به‌سایر عوامل بی‌اعتنا هستند، نباید در طراحی لحاظ گردند.

هدف اصلی مقاوم‌سازی باید اصلاح ضعف اصلی سازه متناسب با بهبود عملکرد لرزه‌ای آن باشد. در کنار برقراری اتصال بین اعضای سازه‌ای جدید و قدیم، مهم‌ترین جنبه این عمل (مقاوم‌سازی)، انتقال مناسب نیروی داخلی اعضا ناشی از عملکرد زلزله، به‌شالوده است.

علاوه بر این، راهکار مورد استفاده در مقاوم‌سازی باید بر پایه ملاحظات کاربری ساختمان در آینده باشد. در حالات خاص، خصوصیات کاربری سازه می‌تواند با اضافه نمودن اعضای سازه‌ای ضروری، بهبود یابد.

۲ـ۱ راهکارهای توصیه‌شده

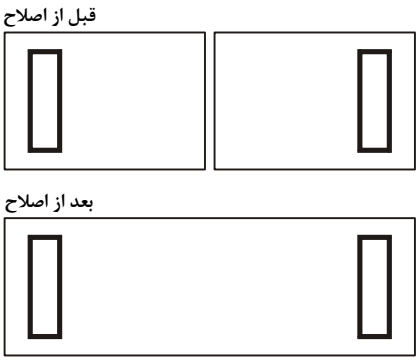
به‌استثناء راهکار اول یعنی بهبود منظمی سازه، سایر روش‌های مقاوم‌سازی که در ادامه معرفی می‌شوند، به‌لحاظ سادگی و سهولت، تنها به‌اصلاح یک مشخصه ویژه سازه‌ای محدود می‌شوند. (مقاومت نهایی، شکل‌پذیری، سختی، میرایی و جرم). هرچند در عمل اصلاح تنها یک مشخصه خاص سازه‌ای مد نظر نبوده و به‌همین دلیل در عمل روش‌های مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند.

رفتار و عملکرد سازه‌ای اعضا قبل و بعد از مقاوم‌سازی، با کمک منحنی‌های ظرفیت نمایش داده می‌شود. منحنی ظرفیت روند ساده‌ای را برای تعیین نیروی جانبی افقی معادل، تابعی از تغییر مکان افقی ساختمان، ارائه نموده و امکان مقایسه بین ظرفیت تغییرشکل ساختمان و سطح تقاضای تغییرشکل ناشی از عملکرد زلزله را فراهم می‌کند. جزییات این روش به‌طور مبسوط در استاندارد SIA 021 (2005) ارائه شده است.

راهکار ۱ ـ بهبود منظمی ساختمان

اصولاً کلیه روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌ای در راستای کمک به‌بهبود منظمی ساختمان در توزیع سختی، مقاومت و جرم سیستم سازه‌ای در پلان و ارتفاع می‌باشند. لذا اعضای سازه‌ای جدید باید به‌گونه‌ای طراحی و اضافه شوند تا منظمی مورد نظر سیستم جدید سازه‌ای نیز تأمین گردد.

مثال ساده‌ای از این راهکار تبدیل دو بخش مجزای ساختمان با سیستم مهاربندی خارج از مرکز به‌یک مجموعه واحد و کامل با مهار جانبی متقارن است (شکل ۲ ـ ۱)، نظیر آنچه که در دبیرستان Neufeld در شهر برن انجام شده است (مثال ۱۵). در این مثال یک سیستم خرپای فلزی در تراز همکف، منظمی ساختمان را در پلان و ارتفاع به‌میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است.



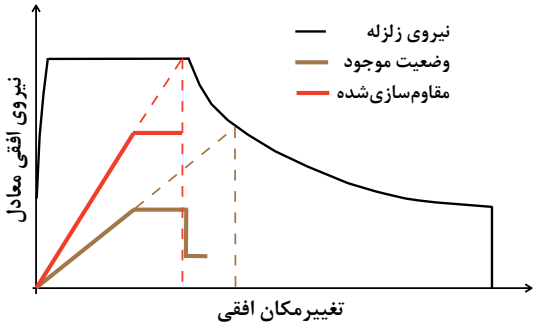
شکل ۲ ـ ۱ راهکار بهبود منظمی ساختمان

با از بین بردن درز انبساط، دو نیمه جداگانه ساختمان با سیستم مهار جانبی نامتقارن (قبل)، به‌سیستم یکپارچه‌ای با مهار جانبی متقارن تبدیل شده و دو هسته بتنی در دو انتهای پلان قرار گرفتند (بعد از مقاوم‌سازی).

راهکار ۲ ـ افزایش مقاومت سازه‌ای

روش سنتی و متعارف مقاوم‌سازی، افزایش مقاومت سیستم سازه‌ای با اضافه کردن اعضای جدید یا تقویت اعضای موجود می‌باشد که نمونه‌ای از آن اضافه کردن دیوارهای بتنی جدید یا خرپاهای فلزی است. با اتخاذ این راهکار مقاومت و سختی سازه افزایش می‌یابد، در حالی‌که ظرفیت تغییرشکل سازه عملاً بدون تغییر خواهد ماند. به‌واسطه افزایش سختی سازه، سطح تقاضای تغییرشکل در عملکرد زلزله می‌تواند به‌سطح ظرفیت تغییرشکل سیستم سازه‌ای، کاهش یابد.

رفتار نیرو ـ تغییرمکان در روش افزایش مقاومت به‌صورت ساده در شکل ۲ ـ ۲ نشان داده شده است که معمولاً منحنی ظرفیت سازه موجود و سازه تقویت‌شده خوانده می‌شود. این روش در تعدادی از مثال‌های فصل سوم به‌کار رفته است. نمونه‌ای از کاربرد این روش در ایستگاه زیرزمینی شهر بازل با تقویت قاب‌های فولادی و دیوارهای بتنی زردرنگ مطابق شکل ۲ ـ ۲ بوده است (مثال ۴).



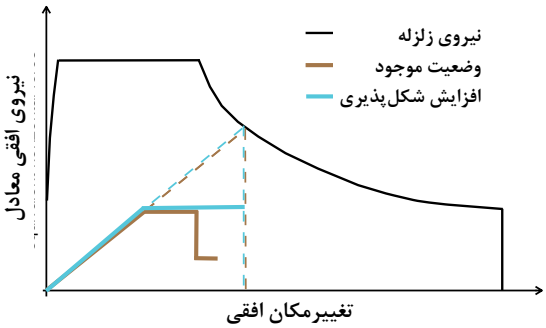
شکل ۲ ـ ۲ منحنی ظرفیت در روش «تقویت اعضا»

منحنی ظرفیت سازه موجود و سازه تقویت شده (نیروی افقی معادل در مقابل تغییرمکان افقی) و در کنار آنها، سطح تقاضا در عملکرد زلزله نمایش داده شده است.

راهکار ۳ ـ افزایش شکل‌پذیری

شکل‌پذیری در تعریف ساده، ظرفیت تغییرشکل پلاستیک بعد از حد تسلیم یا پس از حد ظرفیت تغییرشکل الاستیک سازه یا عضو سازه‌ای می‌باشد. شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای ترد یا

شکننده نظیر دیوارهای بنایی، با اضافه نمودن نوارهای FRP می‌تواند به‌مقدار زیادی افزایش یابد. در این حالت ظرفیت تغییرشکل مقطع (الاستیک یا پلاستیک) ارتقای می‌یابد، در حالی‌که مقاومت نهایی مقطع و سختی عضو به‌مقدار کمی افزایش یافته است (شکل ۲ ـ ۳).



شکل ۲ ـ ۳ منحنی ظرفیت در روش «افزایش شکل‌پذیری»

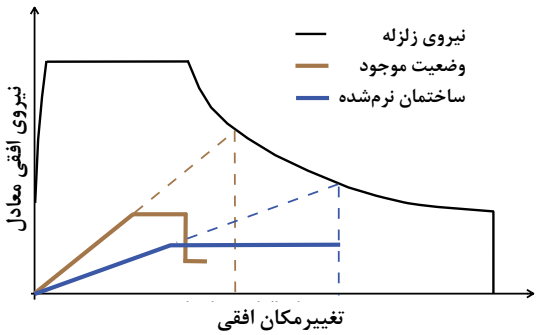
افزایش شکل‌پذیری منجر به‌ایجاد ظرفیت تغییرشکل پلاستیک بزرگتری می‌گردد و این به‌معنی کشیدگی منحنی ظرفیت در امتداد افقی و مطابق با سطح تقاضای تغییرمکان ناشی از زلزله است.

این روش مقاوم‌سازی به‌تنهایی در هیچ‌یک از مثال‌های فصل سوم استفاده نشده است. به‌عنوان نمونه شکل ۲ ـ ۳ دیوار بنایی را نشان می‌دهد که با تسمه‌هایی از جنس الیاف کربن (FRP) در یک ساختمان تجاری در شهر زوریخ مقاوم‌سازی شده است.

راهکار ۴ ـ نرم‌سازی یا کاهش سختی

نرم‌سازی سیستم سازه‌ای از طریق کاهش سختی باعث کاهش هم‌زمان نیروها و افزایش تغییرمکان ناشی از زلزله می‌گردد. یکی از کاربردهای عملی این روش تبدیل سیستم اتکایی طولی پل‌های چند دهانه شاهتیری از حالت مفصل به‌غلتک است (شکل ۲ ـ ۴).

جداسازی لرزه‌ای با استفاده از بالشتک‌های افقی نرم با میرایی بالا و از جنس لایه‌های پلاستیک مسلح، نمونه دیگری از کاربرد روش نرم‌سازی است. به‌واسطه کیفیت میرایی خوب این نوع بالشتک‌های ویژه، کاهش نیروهای ناشی از زلزله هم‌زمان با کاهش سختی، مطابق روش ۵، اتفاق می‌افتد. یکی دیگر از روش‌های نرم‌سازی سیستم سازه‌ای، حذف کلاف‌های سخت، میان‌قاب‌ها یا پُرکننده‌ها می‌باشد، به‌گونه‌ای که سیستم سازه‌ای بتواند در امتداد افقی تغییرشکل بیشتری تحمل نماید.



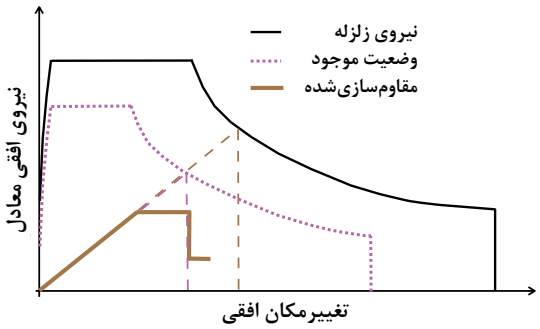
شکل ۲ ـ ۴ منحنی ظرفیت در روش «نرم‌سازی»

با نرم‌سازی سازه‌ای، سختی سازه که شیب بخش ابتدایی منحنی ظرفیت است، کاهش می‌یابد. این وضعیت باعث ایجاد نیروهای کوچکتر و تغییرمکان‌های بزرگ می‌گردد. عکس سمت راست نمونه‌ای از سیستم تکیه‌گاهی غلتکی در امتداد طولی یک پل بزرگراهی در شهر بازل را نشان می‌دهد که با نصب کلیدهای برش افقی بر روی پایه اجرا شده است. این پل فقط دارای یک تکیه‌گاه مقید طولی در یکی از کوله‌های انتهایی است.

مثال‌هایی از کاربرد روش «نرم‌سازی» در عملیات مقاوم‌سازی لرزه‌ای، ایستگاه آتش‌نشانی شهر بازل (مثال ۳)، پل Brunnen در بزرگراه A9 شهر سیمپلون (مثال ۲۳) و مخزن نگهداری گاز مایع در ویسپ (مثال ۲۴) می‌باشند.

راهکار ۵ ـ کاهش اثر زلزله با میرایی

افزایش میرایی سازه باعث کاهش آثار زلزله خواهد شد (شکل ۲ ـ ۵). این امر می‌تواند از طریق نصب میراگرهای اضافه در سازه عملی گردد. با نصب جداگرهای لرزه‌ای از نوع بالشتک‌ها و



شکل ۲ ـ ۵ منحنی ظرفیت در روش «افزایش میرایی»

با افزایش میرایی، آثار زلزله بر سازه می‌تواند کاهش یابد به‌گونه‌ای که منحنی ظرفیت ساختمان موجود، ظرفیت تغییرشکلی کافی را نشان می‌دهد. شکل سمت راست یک بالشتک لاستیکی با میرایی زیاد را به‌عنوان جداساز لرزه‌ای در ایستگاه آتش‌نشانی شهر بازل نشان می‌دهد.

تکیه‌گاه‌های لرزه‌ای با میرایی زیاد و سختی ناچیز در امتداد افقی، هم‌زمان با افـزایش میرایـی، سختی سازه کاهش می‌یابد (راهکار ۴) که در سه مثال گذشته بـه‌آن اشـاره گردیـد (ایـستگاه آتش‌نشانی، پل بزرگراهی و منبع گاز مایع).

راهکار ۶ ـ کاهش جرم

در صورتی‌که جرم ساختمان کاهش یابد، نیروهای اینرسی کوچکتر شده و در نتیجـه نیروهـای داخلی و تنش‌های کمتری در هنگام وقوع زلزله در اعضای سـازه‌ای ایجـاد مـی‌شـود. در عمـل کاهش جرم از طریق سـبک کـردن و جمـع‌آوری اجـسام زائـد در تـراز بـام و طبقـات فوقـانی ساختمان انجام می‌شود. هرچند در اغلب موارد به‌دلیل عدم امکـان کـاهش جـرم در بعـضی از فضاهای ساختمانی، این روش چندان کارآیی ندارد.

اصولاً در طراحی و اجرای ساختمان باید استفاده از اجزا و مـصالح سـبک‌تـر بـر مـصالح سنگین ارجح باشد، به‌عنوان مثال در مورد عناصر غیرسازه‌ای (در، پنجره، دیوار و جان‌پناه) این جایگزینی می‌تواند با کاربرد مصالح سبک انجام شود.

راهکار ۷ ـ تغییر کاربری

کاهش نیروهای زلزله نه‌تنها از طریق راهکارهای سازه‌ای امکان‌پذیر است، بلکه از طریق تغییـر کاربری و نوع بهره‌برداری نظیر کاهش رده اهمیت ساختمان نیز ممکن خواهـد بـود. بـه‌عنـوان مثال بیمارستانی مهم و اضطراری با درجه اهمیت III می‌تواند به‌یـک مرکـز درمـانی سـاده بـا درجه اهمیت II یا به‌ساختمان مسکونی با درجه اهمیت I تبدیل شود. در این حالـت نیروهـای زلزله با کاهش درجه اهمیت ساختمان، کاهش می‌یابند.

فصل سوم نمونه‌های اجرایی از کشور سوئیس

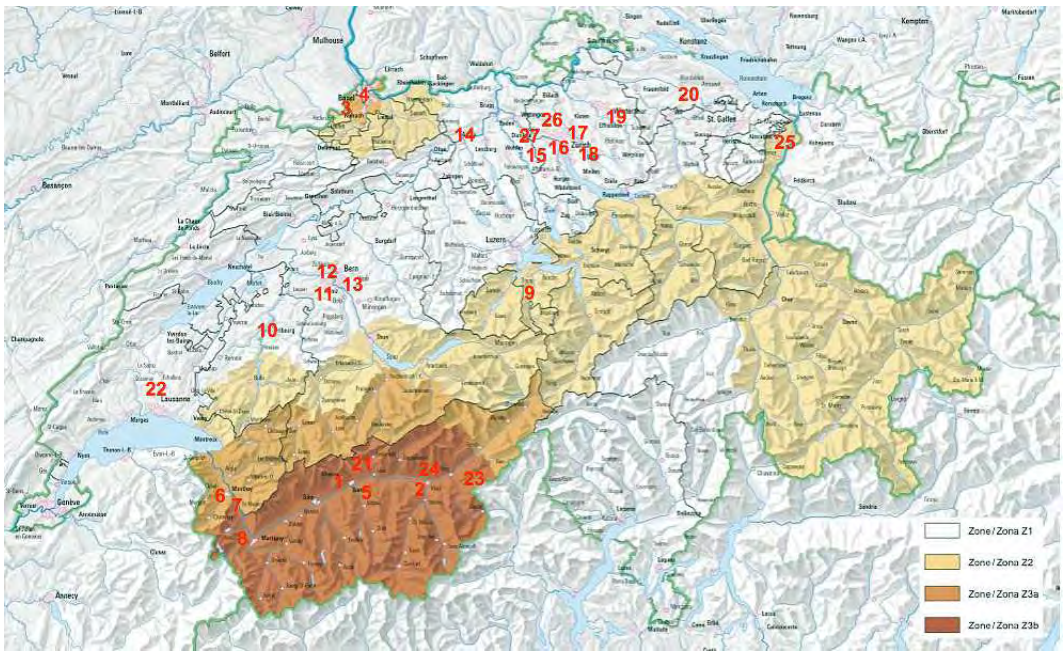
در این فصل مجموعه‌ای از طرح‌های اجرایی و نمونه‌های آموزنده از مقاوم‌سازی انواع مختلف ساختمان‌ها در کشور سوئیس ارائه شده است. این پروژه‌ها بدین علت انتخاب شده‌اند که معرف نمونه‌های کاربردی از مقاوم‌سازی لرزه‌ای هستند. اکثر موارد ساختمان‌های دولتی می‌باشند که اولویت برنامه‌های مقاوم‌سازی را در کشور سوئیس مشخص می‌کند.

موقعیت کلیه مثال‌های ارائه‌شده در این فصل در نقشه پهنه‌بندی لرزه‌ای در شکل ۳ ـ ۱ مشخص شده است. ساختمان‌ها برمبنای اهمیت و موقعیت در پهنه‌بندی لرزه‌ای مرتب شده‌اند، به‌گونه‌ای که مثال‌ها با ساختمان‌های با رده اهمیت III در پهنه لرزه‌خیزی شدید یعنی پهنه Z3b شروع شده و به‌ساختمان‌های با اهمیت کم در پهنه لرزه‌خیزی پایین، یعنی ناحیه Z1 ختم می‌شود. در انتها نیز دو سازه ویژه شامل یک پل بزرگراهی و یک مخزن نگهداری گاز مایع و همچنین سه مورد ساختمان که وضعیت موجود آنها بدون نیاز به‌مقاوم‌سازی قابل قبول است، ارائه شده‌اند.

هر مثال شامل معرفی اولیه از وضعیت موجود ساختمان قبل از انجام هرگونه مقاوم‌سازی، شرح نقطه ضعف سازه‌ای ساختمان که عملکرد آن را در خلال زلزله تحت تأثیر قرار می‌دهد و راهکار عملیات مقاوم‌سازی لرزه‌ای به‌همراه جدول خلاصه‌ای از اطلاعات تکمیلی مرتبط با هر ساختمان است.

توضیحات بیشتر از موارد فنی هر طرح در جدول‌های خلاصه‌ای در پیوست انتهایی و در متن کتاب به‌شرح زیر ارائه شده‌اند:

- نوع زمین: پیوست الف ـ ۱
- رده اهمیت سازه: بند ۱ ـ ۲ فصل اول
- پهنه‌بندی لرزه‌خیزی کشور سوئیس: پیوست الف ـ ۱
- ضریب پذیرش (وضعیت موجود)، α_{eff} : بند ۱ ـ ۲ فصل اول
- ضریب پذیرش (مقاوم‌سازی‌شده)، α_{int} : بند ۱ ـ ۲ فصل اول
- نوع بهره‌برداری: بند ۱ ـ ۴ فصل اول
- ارزش ساختمان: ارزش بیمه‌گذاری ساختمان پس از مقاوم‌سازی



۱ـ اداره پلیس در شهر سیون
۲ـ ایستگاه آتش‌نشانی شهر ویسپ
۳ـ ایستگاه آتش‌نشانی در شهر بازل
۴ـ اتاق برق مدفون در شهر بازل
۵ ـ ساختمان مسکونی ـ تجاری در شهر سیون
۶ ـ مدرسه در شهر مونتی
۷ ـ آموزشگاه عالی بازرگانی در شهر مونتی
۸ ـ ساختمان شهرداری در سنت‌ماریس
۹ ـ سالن چندمنظوره در اُبِردورف
۱۰ ـ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در فریبورگ
۱۱ ـ ساختمان اداره دولتی
۱۲ ـ دبیرستان در شهر برن
۱۳ ـ پردیس آموزشی
۱۴ ـ بیمارستان کودکان در شهر آرائو
۱۵ ـ تالار سخنرانی شهر زوریخ
۱۶ ـ دبیرستان در شهر زوریخ
۱۷ ـ ایستگاه رادیویی شهر زوریخ
۱۸ ـ ساختمان اداری **EMPA**
۱۹ ـ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در وینترتور
۲۰ ـ مدرسه شبانه‌روزی در گوسا
۲۱ ـ آپارتمان مسکونی در کرانس ـ مونتانا
۲۲ ـ هتل شهر بوسینی
۲۳ ـ پل بزرگراهی
۲۴ ـ مخزن گاز مایع
۲۵ ـ ساختمان مسکونی در کریسرن
۲۶ ـ کتابخانه مؤسسه **ETH**
۲۷ ـ برج اداری **SIA** در زوریخ

شکل ۳ ـ ۱ موقعیت مثال‌ها

موقعیت مثال‌های ارائه‌شده بر روی نقشه پهنه‌بندی لرزه‌خیزی کشور سوئیس طبق استاندارد SIA 261 . ساختمان‌های مثال‌های ۱ تا ۲۴ مقاوم‌سازی لرزه‌ای شده‌اند و ساختمان‌های مثال‌های ۲۵ تا ۲۷ نیازی به‌مقاوم‌سازی نداشته‌اند.

۳ـ۱ اداره پلیس در شهر سیون

وضعیت موجود

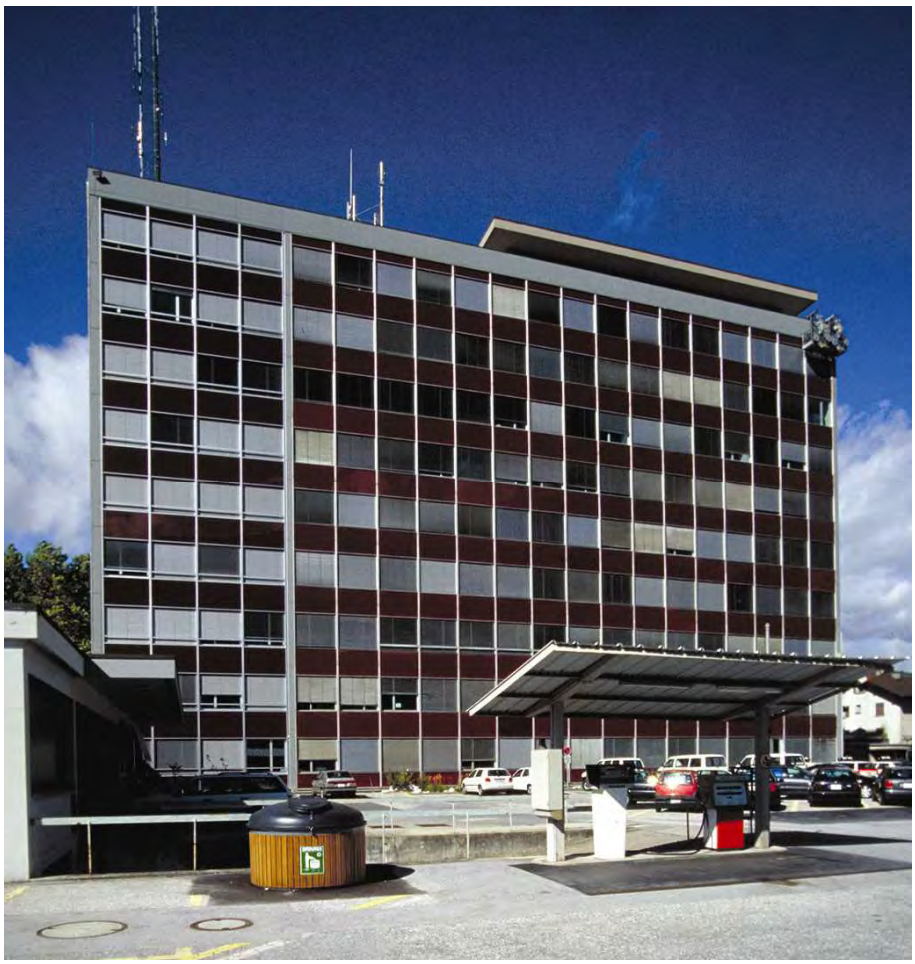
ساختمان اداره پلیس در شهر سیون (sion) یک ساختمان بتن‌مسلح ۱۰ طبقه می‌باشد که در سال ۱۹۶۲ اجرا شده است. مرکز فرماندهی برای بخش خدمات اضطراری در طبقه سوم و مرکز خدمات حفاظت شهری در زیرزمین واقع شده است.

ضعف سازه‌ای

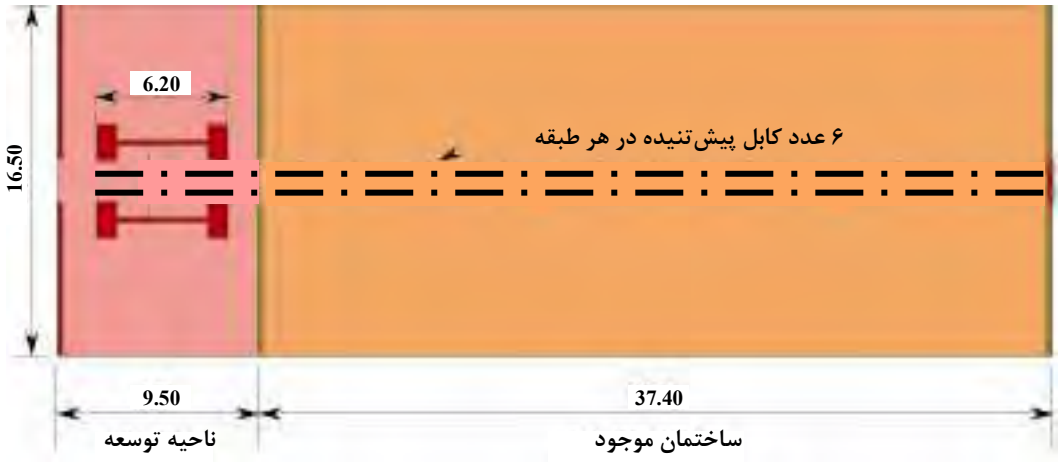
این ساختمان در دوره‌ای احداث شده که توجه به‌اثرات زلزله بر ساختمان‌ها در طراحی‌ها مدنظر نبوده است. در امتداد طولی، ساختمان با استفاده از هسته بتن‌مسلح پلکان و آسانسور، مهار جانبی شده که ناکافی می‌باشد. در امتداد عرضی نیز دیوارهای بتنی پیرامونی به‌عنوان مهار جانبی عمل می‌کنند. در این ساختمان اعضای غیرسازه‌ای به‌ویژه دیوارهای بنایی و سقف‌های کاذب (سقف‌های معلق)، ضوابط لرزه‌ای مورد نیاز برای مرکز فرماندهی ساختمان با رده اهمیت III را اقناع نمی‌کنند (کولر، ۲۰۰۰).

طرح مقاوم‌سازی

در طرح مقاوم‌سازی، ضعف ساختمان با اجرای ناحیه توسعه که در آن مهارهای جانبی لازم برای مقابله با آثار زلزله تأمین می‌شود، جبران گشته است. انتخاب و اجرای دیوارهای بتن‌مسلح I شکل در ناحیه الحاقی ساختمان، آثار پیچش ناشی از خروج از مرکزیت را بر کل سیستم ساختمان کاهش داده است. سختی عرضی دیوارهای جدید در مقایسه با سختی طولی آنها کوچک فرض می‌شود. بخش توسعه با نصب کابل‌های پیش‌تنیده در تراز دال هر طبقه در امتداد طولی، به‌بخش قدیم ساختمان متصل می‌شود. دیوارهای بنایی غیرمسلح در بخش مرکز خدمات اضطراری از طریق ایجاد درزها و پوشاندن آنها با لایه‌های پلی‌استر از سیستم سازه‌ای ساختمان جدا می‌شوند. این درزها و جداسازی دیوارهای بنایی، باعث حفاظت آنها در قبال آثار زلزله و مانع از واژگونی خارج از صفحه دیوارها می‌گردد که در این شرایط دیوارها می‌توانند تغییرشکل‌های ناشی از زلزله را بدون وقوع خرابی تحمل نمایند. سقف‌های کاذب و دیگر تجهیزات نیز در امتداد افقی حفاظت شده‌اند.



نمـای طولی ساختمان اداره پلیس. چهار پنجره آخر در منتهی‌الیه سمت چپ در هر تـراز، بخش توسعـه را نشان می‌دهد.



پلان کف طبقات. وضعیت موجود (راست) و بخش توسعه جدید (چپ) که توسط دیوار بتن‌مسلح I شکل مهار شده است.

مشخصه‌ها

طرح مقاوم‌سازی انتخاب‌شده برای ساختمان اداره پلیس این اجازه را می‌دهد که بهره‌برداری ساختمان تا حد زیادی بدون انقطاع ادامه یابد. ارزیابی این روش نشان می‌دهد هزینه‌های اجرایی با اضافه نمودن بخش جدید نسبت به‌سایر طرح‌ها کاهش یافته‌اند.

پیش‌زمینه

لزوم مطالعات خطرپذیری تجهیزات اصلی ساختمان، انجام ارزیابی‌های لرزه‌ای را در پی داشته است.

نمای بیرونی ساختمان در امتداد عرضی که مهار کابل‌های کششی در سطح بیرونی و در تراز هر طبقه را نشان می‌دهد.

مهار انتهایی ۶ کابل کششی در تیـر عرضی بین دیـوارهای I شکل جدیـد در بخش توسعه ساختمان.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۲
کاربری ساختمان	مرکز خدمات اضطراری و فرماندهی پلیس
ساکنین	PB = 40
ارزش ساختمان	۱۱ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده III
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	طبق مطالعات ساختگاه و مطالعات دینامیک خاک
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	افزایش مقاومت و شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۱۹۹۸
هزینه مقاوم‌سازی	۳ میلیون فرانک سوئیس
گروه مهندسی	رزونانس، سرت، تیزیزر
گروه معماری	الف. بورنت فورینه، پ. کاگنا

۳ـ۲ ایستگاه آتش‌نشانی شهر ویسپ

وضعیت موجود

ایستگاه آتش‌نشانی شهر ویسپ (Visp) در سال ۱۹۷۴ احداث شده است. زیرزمین این ساختمان به‌عنوان یک پناهگاه مورد استفاده است. سیستم سازه‌ای ساختمان اصلی از نوع قاب بتن مسلح با میان‌قاب‌های بنایی بوده و یک بخش الحاقی با دیوارهای بتن مسلح سازه‌ای در بخش شمالی ساختمان نیز اجرا شده است.

ضعف سازه‌ای

دیوارهای لاغر از نوع آجر غیرمسلح در منتهی‌الیه جنوبی ساختمان نقطه ضعف اصلی در قبال آثار زلزله می‌باشد. در این مورد تنش‌های ناشی از نیروهای درون صفحه و خارج صفحه وارد بر دیوار در حین زلزله در کنترل طرح لحاظ شده‌اند. ساختمان ایستگاه در امتداد طولی توسط بخش الحاقی شمالی، مهار شده است.

نمای طولی پشت ساختمان ایستگاه که توسط دیوار بتن مسلح سازه‌ای در منتهی‌الیه چپ تقویت شده است.

طرح مقاوم‌سازی

دیوارهای گوشه در منتهی‌الیه جنوبی ساختمان که وضعیت بحرانی داشتند، توسط ۸ ردیف نوار CFRP[1] پیش‌تنیده که به‌وجه داخلی دیوار چسبانده شدند، تقویت گشتند. نوارهـای CFRP در داخل سقف و دال بتن مسلح کف اول مهار شدند. با استفاده از پیش‌تنیدگی، دیوارهای گوشـه می‌توانند نیروهای زلزله را با تغییرشکل‌های کمتری منتقل نموده و ضوابط ساختمان‌هـای رده III را اقناع نمایند. علاوه بر این، پیش‌تنیده بودن نوارهای CFRP از واژگـونی خـارج از صـفحه دیوار نیز ممانعت می‌کند.

دیوارهای گوشه ساختمان که با نوارهای قائم CFRC تقویت شده‌اند.

مشخصه‌ها

نصب نوارهای CFRP پیش‌تنیده این امکان را فراهم نمود که عملیات اجرایی مقاوم‌سازی بدون نیاز به‌تعطیل و تخلیه نمودن ساختمان انجام شود.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای در چارچوب برنامه حفاظت و تقویت عمومی ساختمان انجام گرفت.

1. Carbon Fiber Reinforced Polymer

دو عدد از نوارهای CFRP پیش‌تنیده در وجه داخلی دیوارهای گوشه ساختمان (تروفر و همکاران، ۲۰۰۴)

پیش‌تنیدگی نوارهای CFRP در سقف بتنی (تروفر، همکاران ۲۰۰۴)

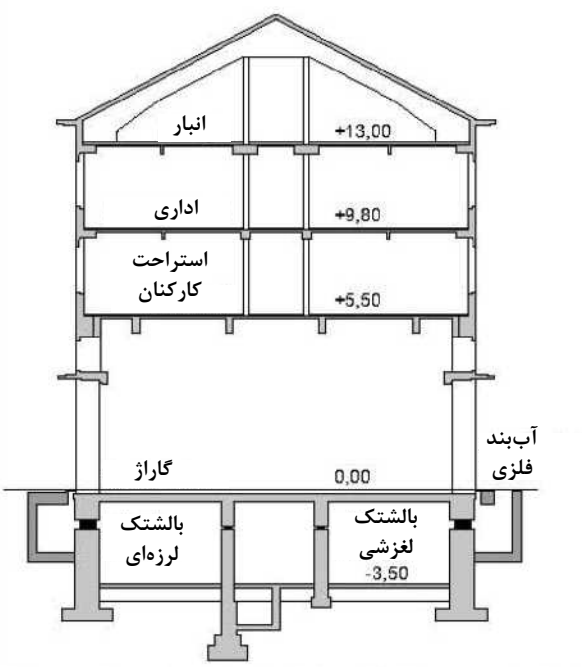
اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۴
کاربری ساختمان	ایستگاه آتش‌نشانی
ساکنین	PB = 2
ارزش ساختمان	۲ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده III
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	نیمه‌سفت (SIA 160)
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت اعضا
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۲
هزینه مقاوم‌سازی	۱/۸ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی	شرکت BIAG

۳ـ۳ ایستگاه آتش‌نشانی شهر بازل

وضعیت موجود

ساختمان اصلی ایستگاه آتش‌نشانی شهر بازل با نام لوتزهوف (Lützelholf) در خلال جنگ جهانی دوم و با مصالح بتن مسلح ساخته شده است. زیرزمین ساختمان فضای بازی با ابعاد

خالص داخلی ۴۴ متر در ۱۵ متر با ۱۱ عدد درب گاراژ در وجه جلویی و پشتی ساختمان است. همچنین سه طبقه دیگر بر روی زمین جهت استراحت روزانه کارکنان، خوابگاه شبانه و بخش اداری و انبار احداث شده‌اند.



مقطع عرضی ساختمان به‌همراه بالشتک‌های لرزه‌ای در زیرزمین (بچمن و زچمن، ۲۰۰۸)

تعبیه درز انبساط در اطراف ساختمان حرکت افقی بالشتک‌های لرزه‌ای جدید را ممکن ساخت.

ضعف سازه‌ای

ستون‌های نسبتاً لاغر و باریک در طبقه زیرزمین که در اطراف درب‌های خروجی گاراژها قرار گرفته‌اند، طبقه نرم را شکل داده‌اند که وقوع زلزله‌ای نسبتاً خفیف نیز منجر به‌شکست این ستون‌ها خواهد شد. علاوه بر این، دیوارها و کف‌ها در طبقات فوقانی ساختمان‌ها نیز قادر به‌تحمل نیروهای ناشی از زلزله نمی‌باشند (بچمن، ۲۰۰۷).

طرح مقاوم‌سازی

مقاوم‌سازی ساختمان با استفاده از جداسازهای لرزه‌ای انجام گرفت. در این راستا، طبقات بالایی ساختمان با بریدن ستون‌ها در نزدیکی تراز سقف زیرزمین و قرار دادن بالشتک‌های لرزه‌ای جدا شدند. به‌منظور امکان حرکت افقی در خلال زلزله، شیاری[۲] دور تا دور ساختمان ایجاد شد و با این کار طول ساختمان‌های مجاور در هر دو انتها به‌میزان ۱۵ تا ۱۸ سانتی‌متر کاهش یافت.

مشخصه‌ها

انتخاب این گزینه یعنی جداسازی لرزه‌ای، مانع توقف بهره‌برداری از محل پارک ماشین‌ها شده و تعلیق فعالیت‌های اداری نیز بسیار محدود گشت. تقویت طبقه زیرزمین به‌روش‌های متعارف و استفاده از دیوارهای بتن مسلح باعث مسدود شدن ۲ عدد از درب‌های خروج خودرو گشته، همچنین تقویت طبقات فوقانی نیز مستلزم عملیات سنگین اجرایی می‌بود.

نصب بالشتک لرزه‌ای در زیرستون در وجه بیرونی دیوار زیرزمین.

2. Gap

پیش‌زمینه

نتایج تحلیل خطرپذیری لرزه‌ای تجهیزات، حاکی از نیاز ساختمان به‌مقاوم‌سازی لرزه‌ای بوده است.

بالشتک‌های لغزشی در زیرستون‌های آزاد در وجه داخلی زیرزمین نصب شده‌اند.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۴۲
کاربری ساختمان	ایستگاه آتش‌نشانی
ساکنین	PB = 60
ارزش ساختمان	۱۳ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده III
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3a
نوع زمین	براساس مطالعات زیرسطحی و دینامیک خاک
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	کاهش صلبیت، کاهش آثار زلزله توسط میرایی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۷
هزینه مقاوم‌سازی	۲۳ درصد ارزش ساختمان معادل ۳ میلیون فرانک سوئیس
گروه مهندسی	شرکت ZPF
کارشناس ویژه	پروفسور هوگو بچمن

۴ـ۳ اتاق برق زیرزمینی در شهر بازل

وضعیت موجود

فضای زیرزمینی وازگنرینگ (Wasgenring) مربوط به‌کارهای صنعتی شهر بازل شامل یک بخش الحاقی بر روی زمین با کاربری تعمیرگاه و ۳ تا ۴ طبقه مدفون برای قرارگیری تجهیزات برقی است. این ساختمان در رده اهمیت III طبقه‌بندی می‌شود، زیرا برق شهر در مواقع اضطراری از طریق تجهیزات نصب‌شده در این فضا تأمین شده و در مواقع بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار است.

ضعف سازه‌ای

در حالی‌که زیرزمین این ساختمان با دیوارهای حجیم و کف‌های بتن مسلح اجرا شده و دارای مقاومت کافی در قبال زلزله می‌باشد، بخش تعمیرگاه فوقانی ضوابط لرزه‌ای را اقناع نمی‌کند. سیستم سازه‌ای بخش الحاقی قاب بتن مسلح با فولاد حداقل و میان‌قاب‌های بنایی است که در هنگام وقوع زلزله تحت تأثیر نیروهای زیادی ناشی از سقف سنگین، به‌ویژه در تراز بالای پنجره‌ها (ناحیه نعل درگاهی) قرار می‌گیرد.

مشخصه‌ها

عرض داخلی ورودی به‌همکف در نمای غربی جهت نصب و برچیدن مبدل‌های بزرگ نمی‌توانست تغییرات زیادی داشته باشد. به‌همین دلیل تقویت نمای غربی ساختمان با استفاده از یک قاب A شکل انجام گرفت، به‌گونه‌ای که واکنش قائم نیروهای وارده در همکف توسط ورق‌های فولادی و نیروهای افقی توسط دال کف تحمل شوند.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان در چارچوب بهسازی مجموعه ساختمان ایستگاه برق انجام گرفت. این عملیات بخشی از برنامه مقاوم‌سازی لرزه‌ای پیش‌بینی‌شده توسط IWB جهت حفاظت تجهیزات و منابع الکتریکی درون ساختمان بعد از وقوع زلزله بوده است. (کولر، ۲۰۰۸)

نمای خارجی تعمیرگاه الحاقی

طرح مقاوم‌سازی

جهت انتقال نیروهای زلزله از سقف سنگین سازه به‌سایر قسمت‌ها، هر چهار دیوار نمای ساختمان باید تقویت می‌شدند. یک قاب فولادی در وجه غربی ساختمان و دیوارهای بتن مسلح در سه وجه دیگر سازه اجرا شدند. دیوارهای جدید توسط نوارهای CFRP پیش‌تنیده تقویت و در دیوارهای بتن مسلح زیرزمین مهار شدند. طبق استانداردهای طراحی، ۵ هزارم درصد حداکثر تغییر مکان جانبی طبقه سهم دیوارهای بنایی در نظر گرفته می‌شود.

قاب فولادی A شکل که در دیوار شمالی و دیوارهای بتن مسلح سازه‌ای جدید که در وجه شمالی تعمیرگاه الحاقی اجرا شدند.

قاب فولادی A شکل جدید در تـراز همکـف در نمـای غربـی و ورق‌هـای فـولادی تقـویتی در همکف.

آماده‌سازی نوار CFRP جهت مهار دیوارهـای بـتن مسلح سازه‌ای جدید.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۴
کاربری ساختمان	ایستگاه برق
ساکنین	PB = 60
ارزش ساختمان	۱۲ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده III
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3a
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای، افزایش شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۶
هزینه مقاوم‌سازی	۵ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی	شرکت‌های Resonance ، Colenco و Stresshead

۵ـ۳ ساختمان مسکونی ـ تجاری در شهر سیون

وضعیت موجود

این ساختمان ۴ طبقه مسکونی ـ تجاری در سال ۱۹۶۵ در شهر سیون و مرکب از بتن و فولاد ساخته شده است. یک دفتر پذیرش در همکف و یک مطب پزشکی در طبقه دوم قرار دارد. طبقات فوقانی ساختمان دارای پلان L شکل هستند. سیستم سازه‌ای از نوع ستون‌های فولادی متکی بر دال مرکب (کامپوزیت) و دیوارهای بتن سازه‌ای مجزا انتخاب شده است. هر دو طبقه پایین با بتن مسلح اجرا شده‌اند.

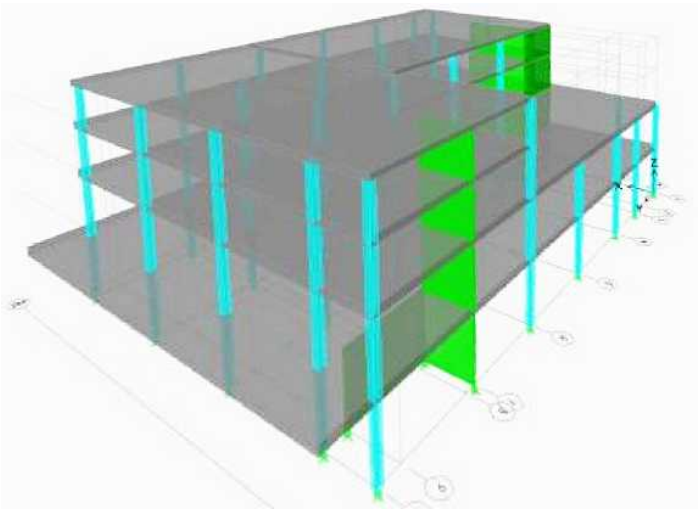
ضعف سازه‌ای

سیستم سازه‌ای به‌شدت در پلان و ارتفاع نامنظم است. از آنجا که دفتر پذیرش نیاز به‌فضای وسیعی در همکف دارد، اغلب عناصر مهاربندی در این تراز حذف شده‌اند. در قبال نیروهای زلزله، طبقه همکف به‌صورت طبقه نرم و نامنظم عمل کرده و مستعد پیچش در پلان می‌باشد.

طرح مقاوم‌سازی

این ساختمان با اجرای هسته بتن مسلح جدید و دیوارهای بتن مسلح که به‌صورت ممتد در طبقات فوقانی ادامه یافته‌اند، تقویت شده است. سختی طبقه همکف علاوه بر این موارد، با اجرای قاب بتن مسلح حجیم افزایش یافته و کلیه اعضای سازه‌ای جدید در تراز زیرزمین مهار شده‌اند.

قاب بتن مسلح جدید در طبقه همکف.



مـدل اجزای محدود ساختمان با دیوارهای بتن مسلح جدید که به‌رنگ سبـز نشان داده شده‌اند (گارسیا و وگل، ۲۰۰۵)

بستن قفسه‌های آرماتور دیوارهای بتن مسلح جدید در همکف.

مشخصه‌ها

قاب بتن مسلح جدید در طبقه همکف به‌گونه‌ای اجرا شده است که بیشترین فـضای ممکـن را برای مرکز تجاری فراهم نماید. برای اعضای سازه‌ای جدید از بتن خودتراکم استفاده شده است. کاربرد از بتن خودتراکم باعث روانی و سهولت اجرای بتن در گوشه‌ها و محل تقاطع دیوارها بـا کف‌های موجود می‌گردد.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان هم‌زمان با توسعه عمومی آن جهت تأمین یک مجموعه متشکل از مطب پزشکی در طبقات فوقانی انجام گرفت.

جزییات اتصال آرماتورهای دیوار بتن مسلح جدید به‌کف موجود (گارسیا، و وگل، ۲۰۰۵).

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۵
کاربری ساختمان	مرکز تجاری، مطب پزشکی
ساکنین	PB = 85
ارزش ساختمان	۴/۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای، بهبود شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
هزینه مقاوم‌سازی	۳ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی	SD Ingenierie Deneriaz به همراه Pralong sion
گروه معماری	گریگوری کامینا ـ شهر سیون

۳ـ۶ مدرسه در شهر مونتی

وضعیت موجود

ساختمان مدرسه چرخه جهت‌یابی (CO) در شهر مونتی در سال ۱۹۷۱ و با مصالح فولادی احداث شده است. سیستم سازه‌ای ساختمان از نوع قاب فولادی در هر دو جهت می‌باشد. سیستم کف طبقات از نوع دال بتن مسلح پیش‌ساخته متکی بر تیرچه‌های فولادی است. این ساختمان چهار طبقه ۳۹ متر طول و ۳۴ متر عرض داشته و طبقه زیرزمین آن با بتن مسلح اجرا شده است.

ضعف سازه‌ای

سیستم اجرای سازه‌های فولادی به‌روش CROCS (مرکز تحقیقات و هماهنگی مطالعات عملیات اجرایی) در دهه ۱۹۶۰ در غرب کشور سوئیس توسعه یافت. در این سیستم اجرایی اتصال اعضای قاب فولادی فقط با استفاده از دو عدد پیچ که جان تیر را به‌ستون متصل می‌کند، تأمین می‌گردد. این اتصال قادر به‌تحمل سهم کوچکی از نیروهای زلزله بوده، همچنین عملکرد دیافراگم (کف صلب) دال پیش‌ساخته ساختمان نیز در قبال بارهای جانبی کافی نمی‌باشد.

نمای برج پلکان جدید در وجه شمالی ساختمان.

طرح مقاوم‌سازی

طرح مقاوم‌سازی ساختمان در دو بخش انجام شده است. در بخش اول دو عدد راه‌پله از جنس بتن مسلح در تمام طبقات به‌عنوان عضو الحاقی و با عملکرد مهاربندی افقی به‌ساختمان اضافه شده است. همچنین کف طبقات نیز با اضافه نمودن خرپاهای افقی جدید تقویت شده و مسیر انتقال نیروهای افقی را از کف طبقات به‌برج‌های پلکان جدید فراهم نموده‌اند.

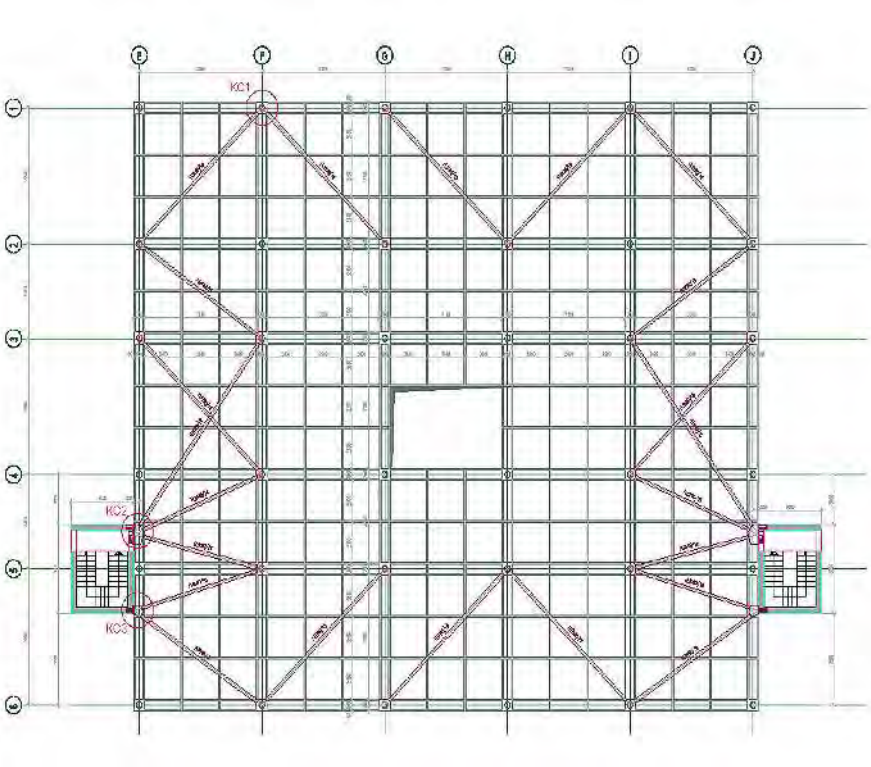
نمای برج پلکان جدید در وجه جنوبی ساختمان.

مشخصه‌ها

به‌منظور تأمین ضوابط و مقررات جدید حفاظت در برابر حریق، لازم بود که ساختمان مدرسه حتماً دو پلکان فرار داشته باشد. در این راستا تجمیع طرح بهسازی در برابر حریق و مقاوم‌سازی لرزه‌ای منجر به‌اجرای پلکان بتن مسلح گردید که نیاز هر دو مورد را اقناع می‌نماید.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای هم‌زمان با توسعه و بهسازی عمومی ساختمان و اضافه شدن یک طبقه جدید به‌آن انجام گرفت.



پلان کف طبقـات بعد از مقاوم‌سـازی که مقطع پلکان جدیـد (رنگ سبز) و خرپـاهای فولادی افقی جدید را در کف (رنگ قرمز) نشان می‌دهد.

برج پلکان جدید و طبقه جدید ساختمان در حال اجرا (سمت جنوب).

آرماتوربندی در طبقه زیرزمین و شالوده برج پلکان جدید.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۱
کاربری ساختمان	مدرسه (آموزشگاه)
ساکنین	PB = 76
ارزش ساختمان	۲۴ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3a
نوع زمین	ریزپهنه‌بندی شهر مونتی (ناحیه تالرند)
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای، افزایش شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۷
هزینه مقاوم‌سازی	۷/۷ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	ا. اشمیتد ـ ر.پروزی ـ شرکت کورمبن و کرتون
گروه معماری	شرکت planification ـ لوزان

۳ـ۷ آموزشگاه عالی بازرگانی در شهر مونتی

وضعیت موجود

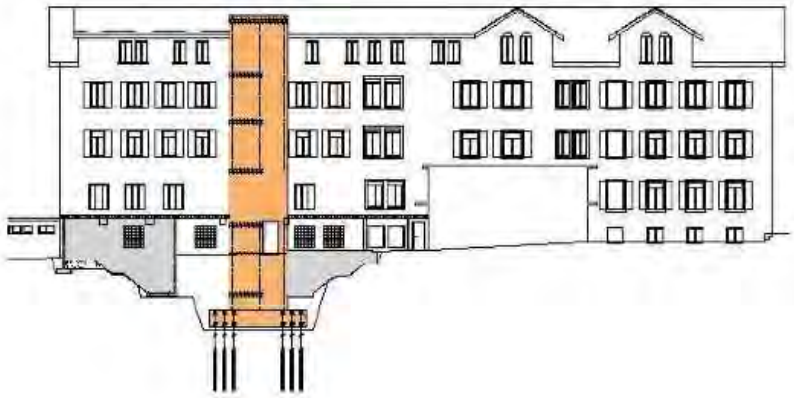
بخش قدیمی‌تر این ساختمان که امروزه به‌نام آموزشگاه عالی بازرگانی (ESC)[1] نامیده می‌شود، در سال ۱۹۰۸ در شهر مونتی ساخته شده است. سپس بخش جدیدی در سال ۱۹۵۰ در امتداد طولی به‌آن اضافه شد که ظرفیت آن را ۲ برابر نمود. ساختمان دارای چهار طبقه از جنس آجر فشاری توپُر غیرمسلح و یک طبقه زیرزمین است. در ساختمان قدیمی، کف‌ها از جنس تیرچه‌های چوبی بوده و در بخش جدید از جنس بتن مسلح اجرا شده‌اند.

ضعف سازه‌ای

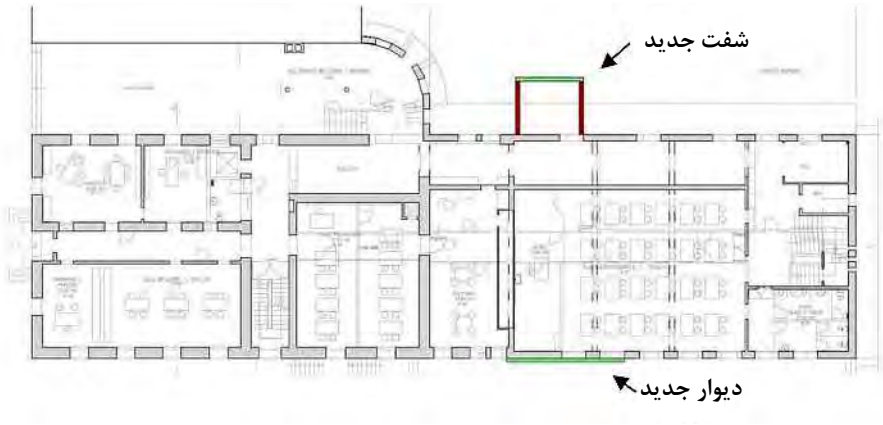
لاغری نسبی و دیوارهای آجری تک‌جداره باعث ضعف عملکرد عمومی سازه در قبال نیروهای زلزله شده است. مهاربندی ساختمان در امتداد عرضی در برابر نیروهای جانبی به‌طور مشهودی ناکافی است، همچنین دیوارهای جداکننده داخلی نیز وجود ندارند؛ در حالی‌که بخش قدیمی ساختمان به‌واسطه دیوارهای ضخیم بنایی در نقطه مقابل این شرایط قرار دارد. مهار ناکافی دیوارهای پیرامونی و کف‌های چوبی از جمله ضعف‌های سازه‌ای در بخش قدیمی‌تر ساختمان می‌باشند.

نمای دیوار پشتی ساختمان به‌همراه شفت بتن مسلح جدید.

1. Superior School of Commerce



دیوار پشتی ساختمان به‌همراه شفت بتن مسلح جدید در میانه بخش جدید (مرحله اول)



پلان بخش قدیمی ساختمان (چپ) و بخش جدید (راست) به‌همراه موقعیت شفت جدید آسانسور (طرح مرحله اول) و دیوارهای بتن مسلح جدید (طرح مرحله دوم) (پروزی و اشمید ـ ۲۰۰۷)

طرح مقاوم‌سازی

بخش جدید ساختمان با استفاده از دیوارهای بتن مسلح در هر دو وجه امتداد طولی تقویت شدند. این دیوارها در کلیه طبقات ساختمان ادامه یافتند. در مرحله اول عملیات، شفت آسانسور در پشت ساختمان جهت اطمینان از مهاربندی اولیه سازه در امتداد عرضی اجرا شد. برای مقابله با لنگرهای واژگونی، شالوده این شفت با استفاده از ۱۲ عدد ریزشمع (میکرو پایل)

در زمین مهار گردید. در مرحله دوم، دیوارهای تکمیلی مستطیل‌شکل از جنس بتن مسلح در وجه جلویی ساختمان اجرا شدند تا مهاربندی ساختمان را در امتداد طولی در ترکیب با شفت آسانسور تأمین نمایند. در بخش قدیمی‌تر، مهارهای لازم بین دیوارهای آجری نما و کف چوبی ساختمان نصب و اجرا گردید.

اجرای شالوده شفت بتن مسلح جدید متکی بر ریزشمع.

مهار شفت آسانسور با استفاده از مسلح‌کننده‌های Swiss-Gewi و میلگردهای تزریق‌شده در کف بتن مسلح موجود.

مشخصه‌ها

در این پروژه لازم بود که عملیات مقاوم‌سازی به‌اجرای دیوارهای پیرامونی محدود گردد، به‌گونه‌ای که امکان فعالیت آموزشگاه در حین عملیات فراهم باشد. امکان اجرای اتاق نگهبانی نیز در کنار شفت بتن مسلح جدید فراهم شده بود.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای در چارچوب و ادامه طرح نوسازی ساختمان آموزشگاه صورت گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۳۰ ـ ۱۹۰۸ و ۱۹۵۰
کاربری ساختمان	مدرسه (آموزشگاه)
ساکنین	PB = 32
ارزش ساختمان	۴/۹ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3a
نوع زمین	ریزپهنه‌بندی شهر مونتی (ناحیه تالرند)
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷
هزینه مقاوم‌سازی	۱۱ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	ر. پروزی و کورمان ـ شرکت کرتون (Cretton)
گروه معماری	ژ. م ـ زیمرمن

۸ـ۳ ساختمان شهرداری در سنت‌ماریس

وضعیت موجود

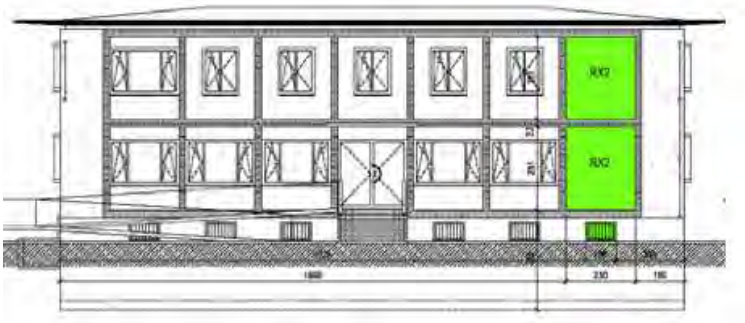
دوره احداث ساختمان دو طبقه شهرداری شهر سنت‌ماریس به‌دهه ۱۹۵۰ بازمی‌گردد. سیستم سازه‌ای ساختمان در امتداد عرضی شامل دیوارهای بنایی و در امتداد طولی متشکل از قاب‌های بتن مسلح با دیوارهای پُرکننده بنایی (نه به‌طور کامل) است. کف‌ها و دیوارهای پیرامونی

زیرزمین از بتن مسلح می‌باشند. طول ساختمان ۲۰/۵ متر و عرض آن معادل ۱۰ متر اندازه‌گیری شده است.

ضعف سازه‌ای

دیوارها در نمای طولی ساختمان عمدتاً مسئله‌دار هستند. در طبقه همکف، دیوارهای بنایی جناحی تا نصف ارتفاع طبقه کوتاه شده‌اند و در قبال واژگونی بدون مهار هستند. با توجه به‌جنس مصالح، خطر گسیختگی ترد برشی حتی در زلزله‌های ضعیف نیز وجود دارد.

نمای دیوار طولی با دیوارهای جدید سازه‌ای بتن مسلح در منتهی‌الیه سمت راست.



نمای ارتفاعی که دیوارهای بتن مسلح جدید (رنگ سبز) را در جلو دیوار طولی ساختمان نشان می‌دهد.

طرح مقاوم‌سازی

در هر دو وجه از نمای طولی ساختمان یک پانل بتن مسلح سازه‌ای اجرا گردید. هر دو دیوار جدید به‌دیواره‌های پیرامونی زیرزمین مهار شده و در هر دو طبقه فوقانی نیز امتداد یافتند. در این شرایط در پلان ساختمان، یک سیستم مهار جانبی متقارن در امتداد طولی تأمین شده است.

مشخصه‌ها

با توجه به‌وجود دیوارهای بزرگ و ضخیم بنایی در نمای ساختمان، ضریب پذیرش در امتداد عرضی معادل ۰/۷ به‌دست آمده است. بر مبنای ضوابط پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 و با توجه به‌تعداد کم سکنه ساختمان (PB = 2.2)، نیازی به‌مقاوم‌سازی لرزه‌ای در امتداد عرضی نبوده است.

آرماتوربندی دیوار بتنی سازه‌ای در نمای امتداد طولی.

پلان کف که دو دیوار جدید بتن مسلح را در امتداد طولی (رنگ سبز) نشان می‌دهد.

پیش‌زمینه

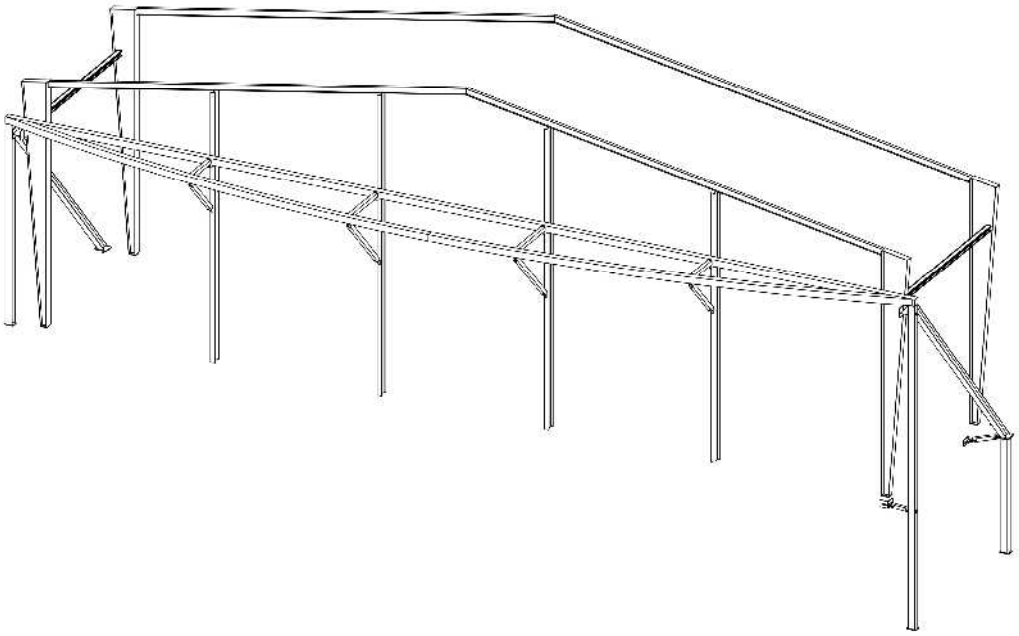
مقاوم‌سازی لرزه‌ای در قالب برنامه نوسازی عمومی ساختمان با هدف ایجاد مرکز آموزش جدید انجام شده است.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۵۵
کاربری ساختمان	مرکز آموزش
ساکنین	PB = 2.2
ارزش ساختمان	۱/۴ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3a
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای و افزایش شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
هزینه مقاوم‌سازی	۳/۵ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	ر.پروزی و کورمان ـ شرکت Cretton
گروه معماری	پ.پ. بوربان

۹ـ۳ سالن چندمنظوره در اُبِردورف

وضعیت موجود

سالن چندمنظوره در پادگان نظامی شهر ابردورف در دهه ۱۹۷۰ و با رعایت استانداردهای فنی برای سیستم سازه‌ای اجرا شده است. ابعاد سالن در طبقه تجمع افراد ۵۰ متر طول و ۲۷ متر عرض دارد. زیرزمین ساختمان از جنس بتن مسلح بوده و از یک طرف باز است. سیستم سازه‌ای سالن ترکیبی از دو عدد سوله فولادی با پای مفصلی و از نیمرخ‌های IPE می‌باشد که دهانه عرضی را پوشش می‌دهند. این قاب‌ها در امتداد طولی توسط دیوارهای آجری حد فاصل قاب‌ها مهار شده‌اند.



نمایش سه‌بعدی از خرپای شکم ماهی برای تقویت وال‌پست‌های انتهایی.

ضعف سازه‌ای

مشکل اصلی در مورد این سالن ضعف عملکرد طولی در قبال بارهای باد و زلزله بوده است. خرپای عرضی که در سقف سالن قرار گرفته دارای ضعف اجرایی و ضعف طراحی در اتصالات بوده است. همچنین مهاربندی افقی قاب‌های فولادی پامفصل در امتداد طولی سالن کافی نبود، هرچند در امتداد عرضی، ظرفیت باربری نهایی قاب‌های فولادی به‌ارتفاع ۱۰ متر در قبال بارهای باد و زلزله کافی بوده است. شرایط قاب فولادی سالن تحت زلزله پهنه Z2 در رفتار الاستیک باقی می‌ماند.

طرح مقاوم‌سازی

طرح مقاوم‌سازی در مرحله اول با تمرکز بر جبران ضعف سالن در امتداد طولی و در قبال نیروی باد انجام گرفت. در این راستا تکیه‌گاه‌های جدیدی به‌بخش فوقانی ستون‌های نمای انتهایی (وال‌پست‌ها) اضافه شد و یک خرپای تقویتی به‌فرم شکم ماهی در دو انتهای سالن به‌عنوان مهار افقی اجرا شد. نیروهای افقی در امتداد طولی از طریق این خرپای افقی به‌بادبندهای قوی کناری و از آنجا به‌زیرزمین منتقل می‌شوند.

تقویت در امتداد طولی با خرپای افقی شکم ماهی متکی بر وال‌پست‌های انتهایی.

مشخصه‌ها

طرح مورد نظر که به‌صورت مدولار برای حدود ۳۰ سالن دیگر با ساختمان‌های مشابه تکرار شده بود، در این مورد نیز به‌کار گرفته شد. سیستم سازه‌ای مقاوم در برابر نیروی باد شامل قاب‌های فولادی بود که در هر دو انتها تقویت شدند. تقویت دیگری برای مقابله با نیروهای ناشی از زلزله پهنه Z2 در شهر ابردورف به‌سیستم مورد نظر اضافه گردید. در این راستا هر دو سیستم فولادی تقویتی در دو انتها از طریق دو تیرورق در طرفین و در امتداد طولی سالن به‌هم متصل شدند. اضافه هزینه برای مقابله با نیروهای زلزله حدود ۱۵ درصد هزینهٔ تقویت در قبال نیروهای باد بوده است.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای در راستای برنامه ارزیابی عمومی و استانداردسازی سالن‌های ایالت سوئیس رئال (Suisse Real) انجام شده است.

ستون کناری از سیستم تقویتی خرپای شکم ماهی در طبقه پایین.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۳
کاربری ساختمان	سالن ورزشی
ساکنین	PB = 5
ارزش ساختمان	۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	BWK II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z2
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۷
هزینه مقاوم‌سازی	۰/۵ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	ارنست وینکلر + شرکت Berger + Emch

۳ـ۱۰ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در فریبورگ

وضعیت موجود

مرکز بیورگارد در شهر فریبورگ (Fribourg) سوئیس شامل سه عدد ساختمان ۸ طبقه مسکونی است که در سال ۱۹۷۰ احداث شده‌اند. در هر یک از ساختمان‌ها یک مرکز تجاری در طبقه همکف نیز پیش‌بینی شده و دو طبقه پایین‌تر برای پارکینگ و انبار مورد استفاده هستند. سیستم ساختمانی این مجموعه از نوع دیوارهای بنایی غیرمسلح در طبقات فوقانی است که بر روی ستون‌های بتن مسلح طبقه همکف متکی هستند. کف‌های ساختمان از نوع بتن مسلح اجرا شده‌اند.

ضعف سازه‌ای

در وضعیت اولیه، ساختمان دارای طبقه نرم در تراز همکف به‌لحاظ سختی جانبی است. این شرایط در انتقال سختی از دیوارهای بنایی غیرمسلح طبقات فوقانی به‌ستون‌های بتن مسلح در تراز مرکز خرید اتفاق می‌افتد. ضعف سازه‌ای مورد اشاره مربوط به‌عملکرد لرزه‌ای ستون‌های طبقه همکف و به‌ویژه عدم کفایت آرماتورها در اتصال تیر به‌ستون بوده است. علاوه بر این تعدادی از دیوارهای بنایی نیز فاقد ظرفیت سازه‌ای کافی بودند.

طرح مقاوم‌سازی

هدف از مقاوم‌سازی، تأمین سیستم سازه‌ای مقاوم جانبی در هر دو امتداد اصلی ساختمان بوده است. این امر با استفاده از اجرای دو دیوار برشی بتن مسلح لاغر که در همه طبقات ادامه یافته‌اند، احراز گردید. دیوارهای جدید بر روی تعدادی ریزشمع در تراز شالوده مهار شدند.

دیوار پیرامونی جدید بتن مسلح که در جلوی دیوار موجود بتن‌ریزی و اجرا می‌گردد.

مشخصه‌ها

اتصال دیوارهای جدید سازه‌ای به‌لبه انتهایی دال کف با استفاده از کاشت آرماتور مهاری (شاخک) و تزریق آنها برقرار گردید.

نمای دیوار محیطی سازه‌ای جدید از نوع بتن مسلح.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای این ساختمان براساس مطالعات و ارزیابی‌های تفصیلی مجموعه و با هدف توسعه کاربری ساختمان برای ۳۰ سال آینده انجام گرفت.

پلان طبقه همکف به‌همراه موقعیت دیوارهای بتن مسلح جدید (لاتلین، ۲۰۰۳).

جزییات آرماتوربندی دیوارهای سازه‌ای جدید به‌همراه شاخک‌های کاشته‌شده در دال کف موجود.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۰
کاربری ساختمان	ساختمان مسکونی و مرکز تجاری
ساکنین	PB = 135
ارزش ساختمان	۲۳ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	سفت
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.5$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت و بهبود عملکرد سازه‌ای
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۲
هزینه مقاوم‌سازی	۷/۴ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	شرکت Centec
گروه معماری	لاتلتین و مونرات
کارشناس ارشد	پروفسور پیتر مارتی

۳ـ۱۱ ساختمان اداره دولتی برن

وضعیت موجود

ساختمان برنرهوف که در حال حاضر مقر دایمی وزارتخانه تجارت می‌باشد، در سال ۵۷ ـ ۱۸۵۵ و به‌پیروی از سبک ساختمانی فردریچ استادر ساخته شده است. سازه این ساختمان ۶ طبقه از نوع دیوارهای سنگ طبیعی و کف‌های متکی بر الوارهای چوبی بوده و به‌عنوان یک بنای قدیمی و یادبود، تحت حفاظت می‌باشد.

ضعف سازه‌ای

کف‌های متکی بر تیرها و الوارهای چوبی و دیوارهای سنگ طبیعی، عامل اصلی ضعف این ساختمان در عملکرد لرزه‌ای هستند. انتقال بارهای جانبی زلزله از تیرهای چوبی کف به‌دیوارهای سنگی به‌طور کامل انجام نمی‌گیرد. بعضی از دیوارها در طبقه همکف ساختمان آسیب دیده‌اند، علاوه‌بر این پایداری خارج صفحه تعداد دیگری از دیوارها نیز بحرانی است.

نمای شرقی ساختمان

جایگزینی کف‌های بتن مسلح با کف‌های تیر چوبی در باله شرقی ساختمان.

طرح مقاوم‌سازی

طرح مقاوم‌سازی این ساختمان باید در هماهنگی با برنامه حفاظتی میراث فرهنگی کشور سوئیس انجام می‌گرفت. در باله شرقی ساختمان، کف‌های چوبی با کف‌های دال بتن مسلح جایگزین شدند. در سایر نواحی بحرانی، تیرهای چوبی کف با استفاده از بتن تقویت شدند. همچنین پلکان‌های جدیدی خارج از محدوده کف‌های بتن مسلح در کلیه طبقات احداث گردید.

مشخصه‌ها

ضریب پذیرش ساختمان، جز در ناحیه دیوارهای انتهایی بخش شمالی، عموماً می‌تواند تا یک افزایش یابد. در این حالت و با توجه به‌ملاحظات برنامه حفاظت میراث فرهنگی، دیوارهای انتهایی در بخش شمالی بدون هرگونه تمهیداتی به‌حالت طبیعی خود رها شدند، زیرا خرابی آن از نوع واژگونی موضعی بوده و تبعات محدودی خواهد داشت.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای پیرو برنامه نوسازی کامل ساختمان انجام گرفت.

کف بتنی در ناحیه احداث شفت دسترسی جدید.

مهار آرماتورهای کف جدید در دیوارهای بنایی.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۸۵۷
کاربری ساختمان	ساختمان دولتی
ساکنین	PB = 105
ارزش ساختمان	۴۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع E
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.1$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$ (دیوارهای شمالی $\alpha_{int} = 0.1$)
راهکار مقاوم‌سازی	تقویت سازه‌ای
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۴
هزینه مقاوم‌سازی	۰/۴ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	گروه مهندسی WAM

۱۲ـ۳ دبیرستان در شهر نویفلد برن

وضعیت موجود

دبیرستان نئوفلد در سال ۱۹۶۵ در شهر برن با سازه بتن مسلح اجرا شد. این ساختمان شامل یک زیرزمین، طبقه همکف و ۴ طبقه فوقانی بوده و ابعاد محیطی آن در پلان ۶۹ متر در ۳۷ متر می‌باشد. سیستم سازه‌ای ساختمان شامل ستون‌های بتن مسلح به‌همراه دو شفت آسانسور و کف‌های بتن مسلح است.

ضعف سازه‌ای

در وضعیت موجود، ساختمان در کلیه طبقات توسط یک درز انبساط به‌دو نیم‌ناحیه صلب تقسیم می‌گردد و با توجه به‌وجود شفت آسانسور، هر نیمه دارای برون‌محوری عنصر مقاوم نسبت به‌مرکز هندسی است. به‌دلیل دوران پیچشی هر بخش مجزا، خطر عدم تعادل حرکت دو قسمت در محل درز انبساط در زلزله‌های خفیف نیز وجود دارد. همان‌طور که از نمای بیرونی ساختمان مشاهده می‌شود، این سازه دارای طبقه همکف باز و ضعیف است. هر چند به‌دلیل امتداد هسته‌های صلب آسانسور در کلیه طبقات، این ساختمان ضوابط منظمی در ارتفاع را اقناع می‌کند.

طرح مقاوم‌سازی

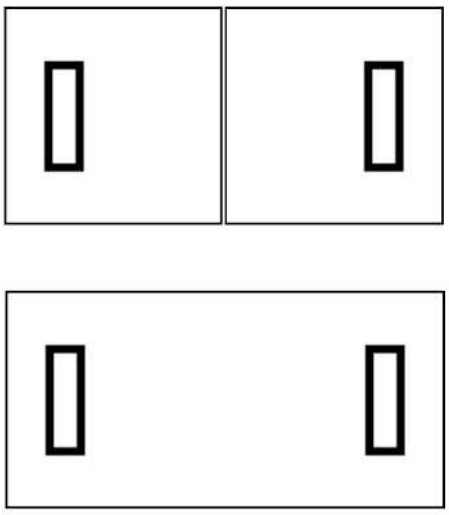
درز انبساط اصلی کف طبقات که در بخش میانی ساختمان قرار داشت، بسته شد. در نتیجه سیستم مهاربندی متقارنی با استفاده از دو هسته لاغر بتنی شفت آسانسورها که در دو انتهای

ساختمان قرار داشتند، تشکیل گردید. مقاوم‌سازی در ترازهای بالاتر با هزینه غیریکسان نسبت به‌طبقات پایین‌تر انجام گرفت.

مشخصه‌ها

بازسازی آسانسورهای ساختمان مستلزم بهسازی شفت آسانسورها در قالب مقاوم‌سازی موضعی با استفاده از نوارهای الیاف کربن (FRP) بوده است.

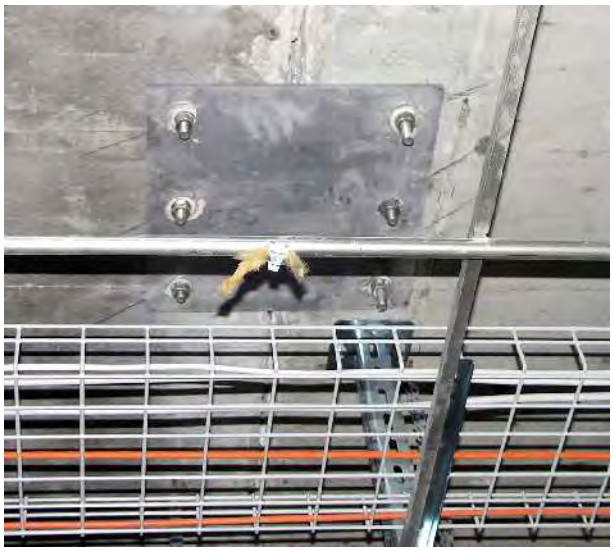
نمای پشت ساختمان



پلان کف طبقات در وضعیت موجود با دو هسته بتنی (بالا) و پلان مقاوم‌سازی‌شده طبقات با عناصر مهاربندی بدون خروج از مرکزیت.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان در چارچوب ارزیابی تفصیلی سازه‌ای بعد از ۴۰ سال بهره‌بـرداری از آن انجام گرفت.



انسداد درزهای انبساطی در کف طبقات با تعبیـه ورق‌های فولادی در هر دو وجه آنها.

مقاوم‌سازی شفت آسانسور با استفاده از نوارهای الیاف کربن (FRP).

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۵
کاربری ساختمان	مدرسه
ساکنین	PB = 200
ارزش ساختمان	۴۳ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع E
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.1$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 0.5$
راهکار مقاوم‌سازی	ارتقای سطح منظمی ساختمان
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۶
هزینه مقاوم‌سازی	۰/۷ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	مشاور Marchand و همکاران

۱۳ـ۳ پردیس آموزشی در استرموندیگن برن

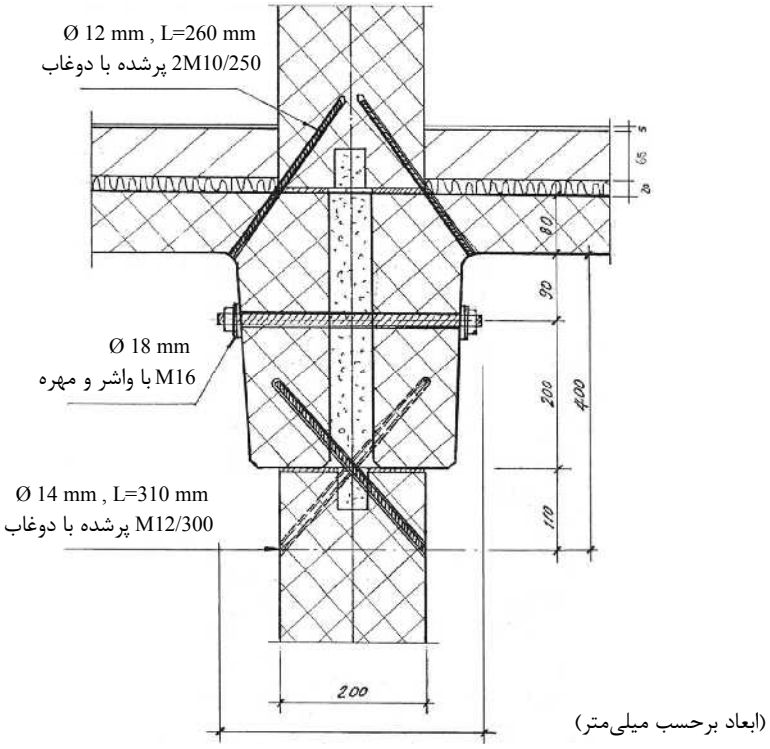
وضعیت موجود

پردیس آموزشی روتی (Rüti) در شهر استرموندیگ در اواخر دهه ۱۹۶۰ با استفاده از سیستم پیش‌ساختگی اجرا شده است. این محوطه شامل یک ساختمان آموزشی ۵ طبقه، یک ساختمان ۲ طبقه و یک سالن ژیمناستیک بوده است. ستون‌ها، تیرها و دیوارها از مقاطع پیش‌ساخته بتنی و دال طبقات به‌صورت مجوف (وافل) اجرا شده‌اند.

ضعف سازه‌ای

اعضای پیش‌ساخته ساختمان بدون برقراری اتصال مناسب به‌یکدیگر در محل خود قرار گرفته‌اند، به‌گونه‌ای که هیچ‌گونه سیستم باربر جانبی برای ساختمان قابل تعریف نیست. عملکرد دال

اتصال پیاده رو به‌ساختمان با استفاده از دیوارهای بتن مسلح مقاوم‌سازی شده.



(ابعاد برحسب میلی‌متر)

مقطع بهسازی‌شده دال سقف که ملحقات سازه‌ای را نشان می‌دهد.

عملکرد سقف نیز به‌عنوان دیافراگم، در برابر بارهای جانبی کافی نمی‌باشد. در این شرایط و در صورت وقوع زلزله، فروریزی ساختمان مشابه خانه‌های ساخته‌شده ازکارت بازی، محتمل است.

طرح مقاوم‌سازی

مقاوم‌سازی این ساختمان با تأمین اتصال اعضای پیش‌ساخته به‌یکدیگر با استفاده از میلگردهای فولادی، تسمه و ورق انجام شده است. علاوه بر این، دیوارهای مجزای ساختمان با استفاده از تسمه‌های عمودی الیاف کربنی (CFRP) و مهار به‌تراز زیرزمین با بتن درجا، تقویت شدند.

مشخصه‌ها

نظر به‌رعایت تناسب و منظمی ساختمان، مقاوم‌سازی لرزه‌ای باید به‌بهسازی اتصالات اعضای پیش‌ساخته و بدون اضافه نمودن هرگونه مهاربندی افقی محدود گردد. اطلاعات تکمیلی ارائه شده در جدول، مربوط به‌ساختمان آموزشی ۵ طبقه می‌باشد.

تسمه‌های فولادی تقویتی برای برقراری اتصال بین دیوارها و دال سقف.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی ساختمان پیرو عملیات نوسازی محوطه ساختمان‌های آموزشی انجام گرفت.

ورق‌های فولادی برای اتصال اعضای سقف.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۸
کاربری ساختمان	ساختمان آموزشی (مدرسه)
ساکنین	PB = 38
ارزش ساختمان	۸ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع E
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.24$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 0.6$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۸
هزینه مقاوم‌سازی	۱/۸ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	مشاور Marchand و همکاران

۱۴ـ۳ بیمارستان کودکان در شهر آرائو

وضعیت موجود

ساختمان پزشکی کودکان در بیمارستان کانتون در شهر آرائو در سال ۱۹۵۴ ساخته شده است. این ساختمان ۵۵ متر طول و ۱۶ متر عرض داشته، دارای ۴ طبقه روی زمین و دو تراز زیرزمین است. سیستم سازه‌ای ساختمان متشکل از دیوارهای بنایی غیرمسلح و ستون‌های بتنی است که به‌کف‌های بتن مسلح نسبتاً کم‌ضخامت متصل شده‌اند.

ضعف سازه‌ای

در امتداد طولی ساختمان، سیستم مهاربندی مورد پذیرشی وجود ندارد. ردیف ستون‌های بتن مسلح در راهرو ساختمان که به‌تیری با ضخامت یک متر متصل شده‌اند، سیستم باربری را در امتداد طولی تشکیل داده‌اند که ستون کوتاه و برش بحرانی مشکل عمده آن است. در امتداد عرضی، مهاربندی ساختمان از طریق دیوارهای نمای غیرمسلح در دو انتها تأمین شده است. از آنجاکه کف طبقات به صورت دال‌های یک‌طرفه در امتداد عرضی طراحی شده‌اند، به‌دیوارهای گوشه ساختمان نیروهای محوری کوچکی منتقل می‌شود، لذا این دیوارها قادر به‌تحمل بخش مهمی از آثار بارهای جانبی زلزله نمی‌باشند. ضعف دیگر ساختمان، استفاده از شالوده منفرد یا نواری در زیرزمین‌های صلب ساختمان است.

نمای طولی ساختمان در سمت زمین بازی کودکان.

طرح مقاوم‌سازی

در امتداد طولی، دو عدد دیوار بتنی جدید در تمام ارتفاع ساختمان اضافه شد که یکی از آنها به‌صورت دیوار همبسته (کوپله) و با شکل‌پذیری ویژه اجرا گردید. برای تأمین مهاربندی در امتداد عرضی ساختمان، دیواری به‌ضخامت ۲۸ سانتی‌متر و طول ۵/۲ متر از نوع بتنی در طرفین دیوارهای بنایی گوشه‌ای اجرا شد. دیوار بتنی سومی در بخش میانی ساختمان و به‌منظور کاهش نیروهای وارد بر دال‌های طویل کف نیز اجرا گردید.

مشخصه‌ها

طراحی و ارائه جزییات دیوارهای سازه‌ای همبسته بر پایه ضوابط ویژه انجام شده است (Paulay,1992). آرماتورهای فولادی در دسترس در سوئیس در زمان عملیات اجرایی شکل‌پذیری کافی را برای مقابله با آثار زلزله نداشتند، هرچند ضوابط استاندارد SIA 162 را اقناع می‌کردند. آرماتورهای با شکل‌پذیری بالا برای نواحی پلاستیک‌شده از خارج کشور وارد شده و در اجرا مورد استفاده قرار گرفتند (Koller, 2000).

دیوار همبسته بتن مسلح جدید در زیرزمین ساختمان.

پیش‌زمینه

جرقه ابتدایی برای ارزیابی تفصیلی سازه ساختمان، از عدم کفایت سیستم حفاظت حریق شکل گرفت. در این ارزیابی، ایمنی ساختمان در برابر آثار زلزله نیز بررسی گردید و رقمی معادل ۶ درصد هزینه کل بازسازی ساختمان، به‌مقاوم‌سازی لرزه‌ای اختصاص یافت.

آرماتورگذاری افقی و قائم دیوارهای همبسته بتن مسلح در تراز همکف و آرماتورهای قطری دسته‌شده در تیرهای پیوند (تیرهای بالا و پایین).

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۵۴
کاربری ساختمان	ساختمان پزشکی (کلینیک)
ساکنین	PB = 350
ارزش ساختمان	۲۴ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	براساس مطالعات ژئوتکنیک و دینامیک خاک
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.1$ (طبق SIA 160)
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$ (طبق SIA 160)
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، افزایش شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۱۹۹۹
هزینه مقاوم‌سازی	۴ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	Peter Zumbach

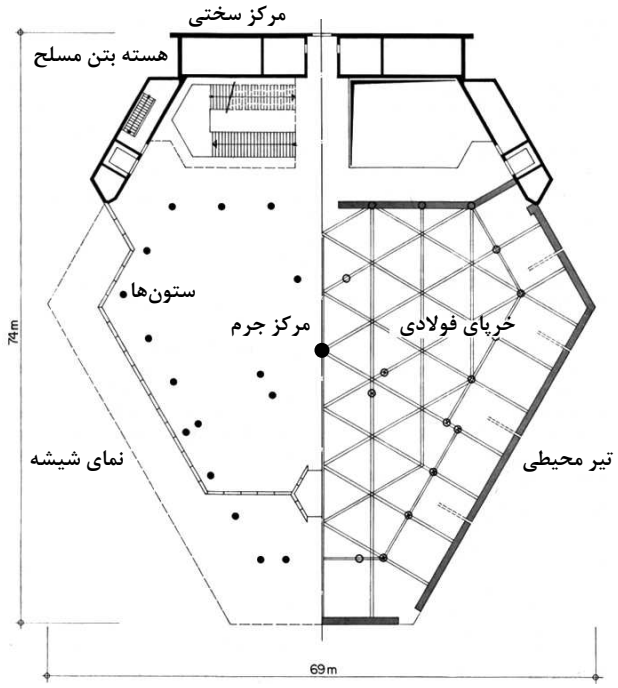
۱۵ـ۳ تالار سخنرانی HPH در ETH زوریخ

وضعیت موجود

تالار بزرگ سخنرانی HPH شهر زوریخ در هونگربرگ در سال ۷۱ ـ ۱۹۷۰ بدون توجه به‌آثار بارهای لرزه‌ای ساخته شد. این ساختمان شامل ۳ تالار سخنرانی و محل نشیمن برای ۱۲۰۰ نفر بر روی محوطه ورودی بزرگ و بر روی محل دسترسی به‌سالن پذیرایی و کافه تریا است.

ضعف سازه‌ای

ضعف سازه‌ای ساختمان به‌لحاظ عملکرد در برابر نیروهای زلزله، سالن بـزرگ در ورودی اصـلی است که در زیر طبقه تالارهای سخنرانی قرار گرفته و یـک طبقـه نـرم را ایجـاد کـرده اسـت.



پلان کف در تراز همکف (چپ) و در تراز فضای تالار و موقعیت مرکز صلبیت و مرکز جرم در وضعیت موجود و قبل از مقاوم‌سازی.
(Schefer, Zwicky, Santchi, 1995)

همچنین خروج از مرکزیت بزرگی حدود ۴۰ متر بین مرکز صلبیت دیوارهای بتن مسلح در پشت ساختمان در طبقه همکف و مرکز جرم طبقات فوقانی وجود دارد. به‌همین دلیل ساختمان تنش‌های پیچشی بزرگی را در هنگام وقوع زلزله تحمل می‌کند.

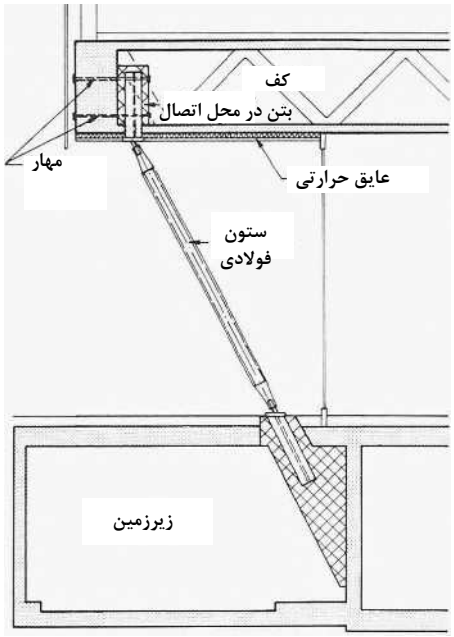
طرح مقاوم‌سازی

ضعف طبقه همکف با استفاده از اجرای خرپای مایل با اعضای لوله فولادی جبران گردید. با این اقدام صلبیت و مقاومت طبقه افزایش یافته و خروج از مرکزیت نامطلوب سیستم مهاربندی در تراز همکف اصلاح گشت.

مشخصه‌ها

خرپای لوله‌ای جدید، تکیه‌گاه مناسبی برای بارهای ثقلی وارد بر طره‌ای کف اول فراهم می‌نماید که در وضعیت موجود، تکیه‌گاه کافی نداشت. با محدود نمودن عملیات بهسازی به‌یک طبقه و همچنین حذف نیاز به‌شالوده جدید، هزینه مقاوم‌سازی به‌حدود ۰/۷ درصد ارزش اولیه ساختمان محدود گردید.

خرپای مورب جدید در تراز همکف با اعضای لوله فولادی.



نمایش مقطع خرپای مورب جدید در طبقه همکف
(Schefer, Zwicky, Santchi, 1995)

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان در قالب طرح نوسازی و بهسازی تراز تالارهای سخنرانی روی همکف، جهت تحمل بارهای ثقلی صورت گرفت. این نمونه، اولین ساختمانی بود که در کشور سوئیس براساس ارزیابی سازه‌ای، مقاوم‌سازی لرزه‌ای گردید.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۷۱ ـ ۱۹۷۰
کاربری ساختمان	تالار سخنرانی
ساکنین	PB = 200
ارزش ساختمان	۷۰ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	خاک از نوع نیمه‌سخت
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.25$ (طبق SIA 160)
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$ (طبق SIA 160)
راهکار مقاوم‌سازی	ارتقای کیفیت، مقاوم‌سازی
زمان مقاوم‌سازی	۱۹۹۴
هزینه مقاوم‌سازی	۰/۷ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	باسلر و هافمن
گروه معماری	بروگی و سانچی
کارشناس عالی	پروفسور هوگو بچمن

۱۶ـ۳ دبیرستان در شهر زوریخ

وضعیت موجود

ساختمان ۵ طبقه دبیرستان ریدن هالدن در شهر زوریخ در اواخر دهه ۱۹۵۰ ساخته شده است. در این ساختمان چهار ناحیه الحاقی شامل کلاس‌های درس در اطراف یک پلکان مرکزی قرار گرفته‌اند. کف‌ها و دیوارها در هسته مرکزی پلکان از جنس بتن مسلح و سایر دیوارهای ساختمان از مصالح بنایی اجرا شده‌اند.

ضعف سازه‌ای

دیوارهای بتن مسلح پلکان مرکزی فاقد آرماتورهای طولی و عرضی کافی هستند، همچنین مهاربندی لازم در تراز بام پلکان تأمین نشده است. کف بتن مسلح طبقات بر روی ستون‌های پاندولی متکی است. دیوارهای بنایی در ناحیه الحاقی به‌واسطه وجود پنجره‌های بزرگ، فاقد یکپارچگی لازم بوده و قادر به‌انتقال بارهای افقی نمی‌باشند.

طرح مقاوم‌سازی

هر چهار دیوار پلکان مرکزی با دو برابر نمودن ضخامت آنها، تقویت شدند. این چهار دیوار تقویت‌شده به‌صورت متقارن در پلان ساختمان جانمایی شده و از تراز زیرزمین تا بام ادامه یافته‌اند. تراز بام ساختمان با استفاده از چهار قاب فولادی نصب‌شده در اطراف پنجره‌ها و در محاذات دیوارهای مرکب، مهار شده است.

تقویت یکی از دیوارهای موجود با دیواری به‌ضخامت ۱۵ سانتی‌متر.

مهاربندی تراز بام ساختمان با استفاده از قاب‌های فولادی جدید.

مشخصه‌ها

با توجه به‌اینکه این دبیرستان به‌عنوان یکی از آثار تاریخی تحت حفاظت قرار داشت، طرح مقاوم‌سازی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که کمترین تأثیر را بر وضعیت ظاهری ساختمان داشته باشد.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای در قالب طرح نوسازی ساختمان ۵۰ ساله مدرسه انجام گرفت.

جزییات گروه کردن آرماتورهای قائم در دیوارهای مرکب (مضاعف).

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۵۸
کاربری ساختمان	دبیرستان
ساکنین	PB = 48
ارزش ساختمان	۴ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع E
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.1$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، ارتقای درجه منظمی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۶
هزینه مقاوم‌سازی	۳ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	والت و گالمارینی
گروه معماری	Pfister Schiess Tropeano و همکاران

۳ـ۱۷ ایستگاه رادیویی شهر زوریخ

وضعیت موجود

ساختمان بلندمرتبه ایستگاه رادیویی DRS سوئیس در خلال سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۰ ساخته شده است. این ایستگاه رادیویی دارای ۸ طبقه و هر طبقه شامل فضاهای اداری و استودیو می‌باشد. ساختمان دارای اسکلت بتن پیش‌ساخته بوده که به‌شفت‌های بتنی آسانسور و پلکان‌هایی که در دو انتهای پلان قرار دارند، متصل می‌شوند.

ضعف سازه‌ای

با توجه به‌وجود دیوارهای بتن مسلح سازه‌ای در تمام ارتفاع، مهاربندی جانبی کافی در امتداد عرضی تأمین شده است. در حالی‌که در امتداد طولی عدم کفایت مهاربندهای جانبی مشهود می‌باشد. در این امتداد تنها چند دیوار در ناحیه شفت آسانسورها وجود دارد.

طرح مقاوم‌سازی

در طرح مقاوم‌سازی دو عدد قاب فولادی جدید با مهاربند واگـرا و بـا هـدف تـأمین مهاربنـدی طولی برای ساختمان ساخته و نصب شدند. دو قاب فولادی جدید حد فاصل ستون‌های بتن مسلح

قاب‌های فولادی جدید واگرا که بین دو ستون بتن مسلح اجرا شده‌اند.

پنهان شدن قاب‌های فولادی جدید واگرا در تزئینات داخلی ساختمان.

و در امتداد دیوارهای راهرو طولی ساختمان، مطابق آنچه که در پلان نشان داده شده، قرار گرفته و در تراز زیرزمین به‌دیوارها و شالوده موجود مهار شدند.

مشخصه‌ها

قاب‌های فولادی تقویتی به‌خوبی با طرح معماری جدید ساختمان هماهنگ شدند، به‌گونه‌ای پس از برداشتن دیوار راهرو اصلی توانستند به‌صورت نمایان باشند.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای در زیرمجموعه مقدماتی مربوط به‌ارزیابی ساختمان ۳۵ ساله ایستگاه رادیویی اجرا شد.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۰
کاربری ساختمان	ایستگاه رادیویی
ساکنین	PB = 150
ارزش ساختمان	۱۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	متوسط
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.3$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، افزایش شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۴
هزینه مقاوم‌سازی	۲/۳ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	فدرر و همکاران ـ مشاور Bauingenieure ـ مشاور Basler و Hofman
گروه معماری	DiGallo

۱۸ـ۳ ساختمان اداری EMPA

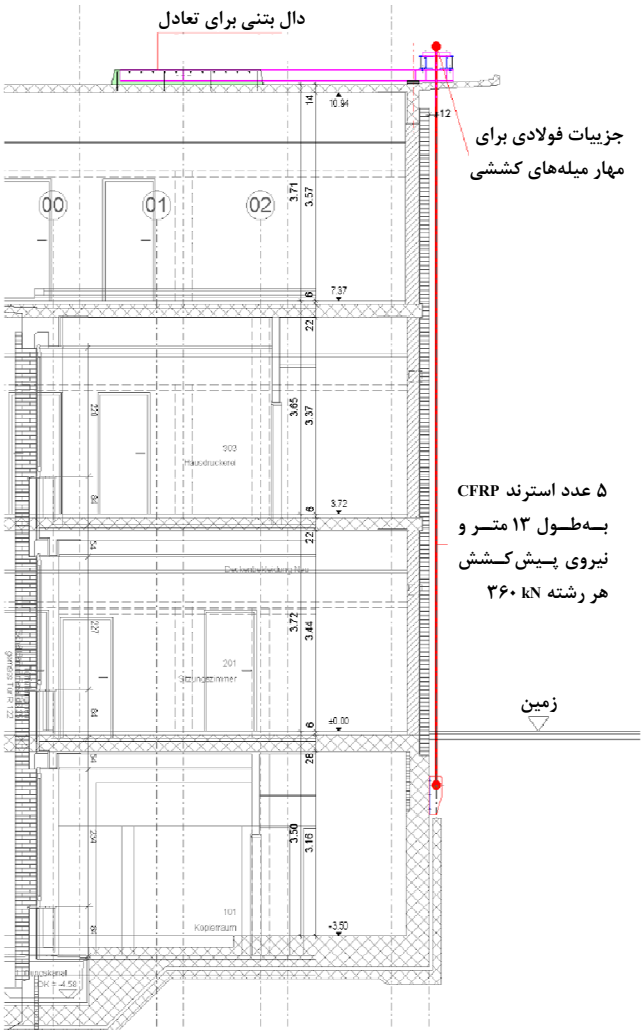
وضعیت موجود

ساختمان اداری سه‌طبقه EMPA در شهر دوبندورف (Dubendrof) حدود ۵۰ متر طول و ۱۸ متر عرض دارد. این ساختمان در سال ۱۹۶۰ و به‌صورت ترکیبی از قاب‌های بتن مسلح، دیوارهای بتن مسلح و دیوارهای بنایی ساخته شده است. کف‌های ساختمان نیز از بتن مسلح می‌باشند.

ضعف سازه‌ای

قاب‌ها و دیوارهای بتن مسلح در اطراف پلکان و چاه آسانسور در امتداد طولی ساختمان، قادر به‌انتقال بارهای لرزه‌ای می‌باشند. سیستم مهاربند افقی در امتداد عرضی ساختمان، شامل دیوارهای بنایی در دو انتها و هسته آسانسور و پلکان در همین امتداد است. در پلان ساختمان، هسته پلکان به‌سمت نمای جنوبی دارای خروج از مرکزیت بوده و همین نزدیکی به‌نمای جنوبی باعث کفایت باربری این وجه از ساختمان شده، درحالی‌که فاصله بیشتر هسته پلکان از نمای شمالی، باعث اعمال بارهای لرزه‌ای بیشتری به‌این بخش گشته است.

تقویت نمای شمالی با استفاده از میله‌های کششی الیاف کربن.



مقطع طولی از نمای شمالی که میله‌های کششی الیاف کربن را نشان می‌دهد.

طرح مقاوم‌سازی

دیوار آجری نمای انتهای شمالی ساختمان به‌ضخامت ۲۲ سانتی‌متر با استفاده از ۵ عدد میله کششی به‌طول ۱۳ متر که در بیرون ساختمان نصب شدند، تقویت گردید. این اولین کاربرد میله‌های کششی از جنس الیاف کربن در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان بود (Bachmann, 2007b). نیروهای پیش‌تنیدگی خارج از مرکز نیز به صورت محوری با استفاده از تجهیزات فلزی نصب‌شده در بام به‌وجه انتهایی ساختمان منتقل گشتند.

مهار فوقانی میله‌های کششی الیـاف کربن در بام ساختمان که نیروی پیش‌تنیدگی را به‌میله‌ها وارد می‌کند.

مشخصه‌ها

میله‌های کششی الیاف کربن به‌گونه‌ای در نمای ساختمان نصب شدند که به‌عنوان یـک المـان معماری نیز جلب توجه نموده و نمای مناسبی داشتند.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای در ادامه برنامه نوسازی کلی نمای ساختمان انجام گرفت.

مهار تحتانی میله‌های کششی الیاف کربن در کنار دیوار زیرزمین.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۰
کاربری ساختمان	ساختمان اداری
ساکنین	PB = 80
ارزش ساختمان	۹ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع E
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.25$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۷
هزینه مقاوم‌سازی	۱/۵ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی معماری سازه	گروه معماری Rounfachwerk
مشاور	پروفسور اچ. سی. هوگو باخمن

۱۹ـ۳ ساختمان مسکونی و مرکز خرید در وینترتور

وضعیت موجود

این ساختمان ۴ طبقه در سال ۱۹۶۰ و با ترکیبی از عناصر بنایی و بتن مسلح ساخته شده است. طبقات فوقانی کاربری مسکونی دارند. فروشگاه مرکزی در طبقه همکف قرار داشته و

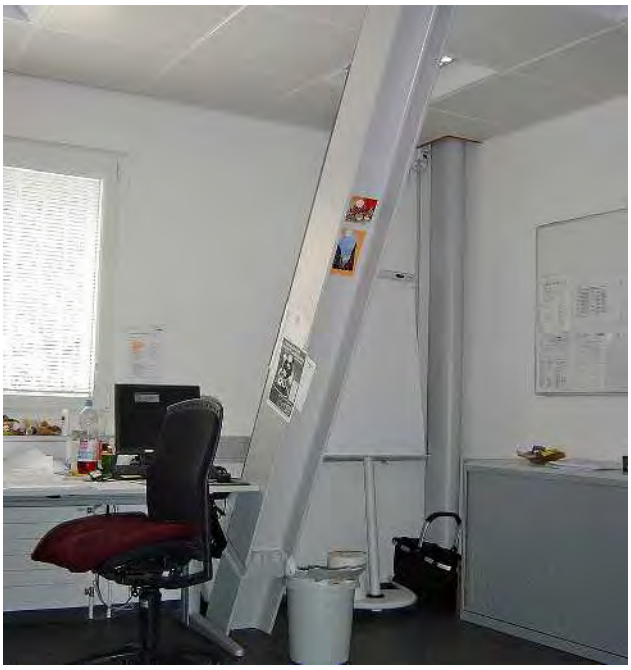
سطحی نزدیک به ۳ چشمه از طبقات فوقانی را پوشش می‌دهد. کف طبقات و زیرزمین از بتن مسلح هستند.

ضعف سازه‌ای

به‌نظر می‌رسد که ساختمان دارای طبقه نرم در همکف بوده و مستعد پیچش در اثر نیروهای زلزله می‌باشد. علاوه بر این، درز انبساط در وسط دهانه طولی ساختمان اثر معکوس بر رفتار لرزه‌ای ساختمان دارد. در خلال نوسازی‌های اخیر، تعدادی از دیوارهای طبقه همکف حذف شدند، لذا سیستم مهاربندی جانبی مطلوبی برای ساختمان متصور نیست.

طرح مقاوم‌سازی

چهار خرپای فولادی جدید V شکل در طبقه همکف ساختمان، در هر امتداد دو عدد، ساخته و نصب شدند. واکنش قائم خرپاها از طریق ستون‌های فولادی جدید در دو انتهای خرپا به‌طبقه زیرزمین منتقل شده و در ریزشمع‌های اجراشده، مهار می‌شوند. واکنش افقی خرپاها به‌دال بتنی موجود در طبقه همکف منتقل می‌گردد.



عضوی از خرپای فولادی V شکل جدید در اتاق اداری طبقه همکف.

عضوی از خرپای فولادی V شکل جدید در اتاق اداری طبقه همکف.

نصب خرپای فولادی جدید V شکل در طبقه همکف.

مشخصه‌ها

مزیت عمده در راهکار ساخت و نصب سازه فلزی در مقایسه با سایر گزینه‌های مقاوم‌سازی، زمان کوتاه عملیات اجرایی بوده است. مدت زمان بازسازی فروشگاه به ۲ ماه محدود گردید.

اتصال خرپای فولادی جدید به‌دال کف طبقه نرم.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای در قالب طرح نوسازی و بازسازی کامل مراکز فروش طبقه همکف انجام گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۶
کاربری ساختمان	ساختمان مسکونی و مرکز خرید
ساکنین	PB = 71
ارزش ساختمان	۵/۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	گروه c
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، ارتقای منظمی ساختمان
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
هزینه مقاوم‌سازی	۲/۲ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	دکتر دئورینگ و شرکت مشاور Oehninger

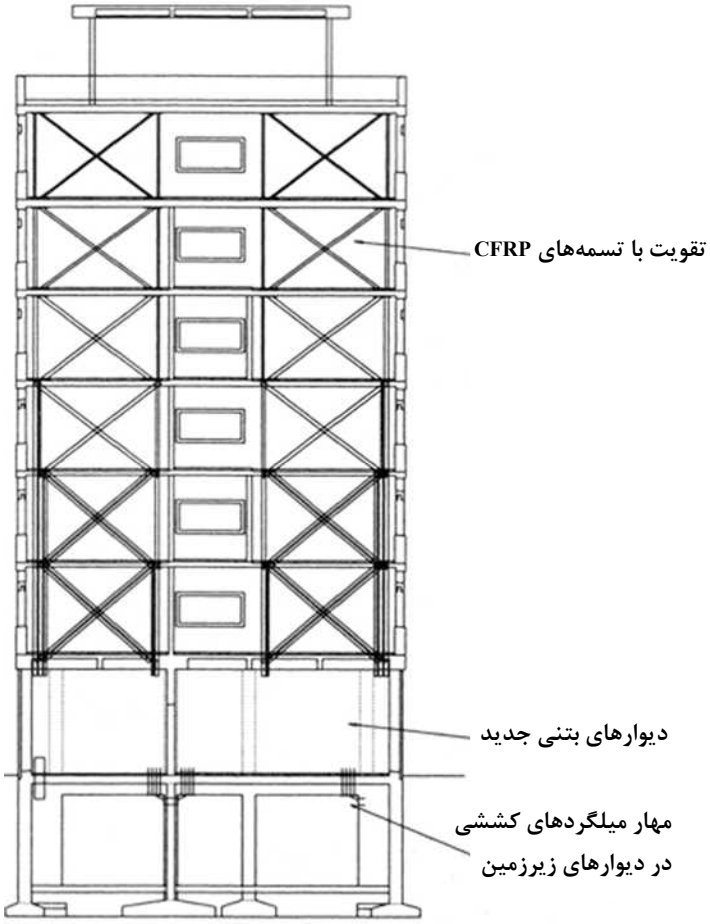
۳ـ۲۰ مدرسه شبانه‌روزی در گوسا

وضعیت موجود

زمان اجرای ساختمان بلندمرتبه دبیرستان شبانه‌روزی فردبرگ (Friedberg) در شهر گوسا به‌سال ۱۹۶۱ باز می‌گردد. خوابگاه دانش‌آموزان و اتاق‌های اداری در این ساختمان ۷ طبقه جای دارند. این مدرسه ۲۴ متر طول، ۱۲ متر عرض و ۲۲ متر ارتفاع دارد. سیستم سازه‌ای ساختمان در امتداد طولی از دیوارهای بتن مسلح سازه‌ای، دیوارهای بنایی در امتداد عرضی و ستون‌های بتنی در نماهای انتهایی است. کف طبقات از بتن مسلح است.

ضعف سازه‌ای

ضعف سازه‌ای این ساختمان در زلزله، وجود دیوارهای آجری غیرمسلح در امتداد عرضی است. از آنجا که دیوارهای بنایی در تراز طبقه همکف قطع شده‌اند، ساختمان دارای طبقه نرم در این تراز و مستعد بروز پیچش‌های بزرگ در اثر زلزله است.



نمای دیوار بنایی عرضی جنوبی با طرح مقاوم‌سازی: اجرای دیوار بتن مسلح جدید در طبقه همکف و تقویت دیوار موجود با نوارهای CFRP در طبقات فوقانی (Borgogno, 2001).

طرح مقاوم‌سازی

نمای جنوبی دیوارهای بنایی در امتداد عرضی و در حد فاصل طبقات دوم تا هفتم ساختمان با استفاده از نوارهای CFRP تقویت شدند. در سمت پلکان، تقویت نمای دیوار با استفاده از نوارهای CFRP محدود به‌طبقات پنجم تا هفتم صورت گرفت. از طبقه دوم تا طبقه چهارم، دیوار بتن مسلح جدیدی در مقابل دیوار موجود اجرا شد. در تراز همکف نیز دیوارهای بتن مسلح جدیدی نصب و در طبقه زیرزمین مهار شدند. نیازی به‌مقاوم‌سازی در امتداد طولی ساختمان وجود نداشت.

تقویت دیوارهای بنایی در اطراف پلکان با نوارهای CFRP.

مشخصه‌ها

تسمه‌های قطری CFRP با استفاده از نبشی‌های برشی جدیدی که به‌تازگی ابداع شده و در یک حفره از پیش‌آماده در دال کف مهار می‌شوند، با استفاده از ورق‌های اتصال و میلگرد مطابق شکل محکم گردیدند. در مورد تسمه‌های قائم CFRP، طول مهاری کافی با استفاده از کاربرد چسب‌های پیوستگی تأمین گردید.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان همراه با سایر ارزیابی‌های سازه‌ای و عملیات پیش‌گیرانه انجام گرفت.

مهار تسمه‌های CFRP با استفاده از نبشی‌های برشی متصل به‌دال کف.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۱
کاربری ساختمان	ساختمان اداری و مدرسه شبانه‌روزی
ساکنین	PB = 25
ارزش ساختمان	۳/۷ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	خاک نیمه‌سفت
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.3$ (طبق ضوابط SIA160)
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$ (طبق ضوابط SIA160)
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، بهبود منظمی سازه
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۱
هزینه مقاوم‌سازی	۱۰ درصد ارزش ساختمان
مهندسی طراح	والتر بورگوگنو

۳ـ۲۱ آپارتمان مسکونی در کرانس ـ مونتانا

وضعیت موجود

این ساختمان ۴ طبقه در شهر کرانس ـ مونتانا (Crans-Montana) در دهه ۱۹۵۰ و در ابتدا به‌عنوان هتل ساخته شده، سپس در سال ۲۰۰۴ به‌یک آپارتمان مسکونی تغییر کاربری داده است. کف‌ها و طبقه زیرزمین از جنس بتن مسلح و دیوارها از نوع مصالح بنایی هستند.

ضعف سازه‌ای

مقاومت سازه‌ای دیوارهای بنایی این ساختمان برای پایداری در برابر نیروهای لرزه‌ای در منطقه خطر نسبی شدید (ناحیه Z3b)، با مقادیر مجاز فاصله زیادی دارد.

طرح مقاوم‌سازی

طرح معماری جدید ساختمان برای تغییر کاربری به‌آپارتمان مسکونی مستلزم حذف تعدادی از دیوارهای داخلی بوده است. در این راستا، چهار دیوار بتنی با ضخامت کم (لاغر) با هدف عملکرد مهاربند جانبی اجرا شدند. با توجه به‌اصول پایه طراحی لرزه‌ای، دیوارهای بتن مسلح جدید به‌طور پیوسته از زیرزمین تا تراز بام ادامه یافتند. این چهار دیوار حتی‌المقدور به‌صورت متقارن با چهار دیوار پیرامونی ساختمان جانمایی و اجرا شدند.

نمای شرقی ساختمان با دیوارهای پیرامونی جدیدبتن مسلح.

مشخصه‌ها

تلاش بر این بود که دیوارهای بتن مسلح جدید تا حد امکان در تطابق با طرح معماری نمای ساختمان باشند.

نمای شمالی ساختمان و دیوار پیرامونی بتن مسلح جدید.

عملیات اجرایی در کنج جنوب شرقی ساختمان.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان در هماهنگی با تغییر کاربری از هتل به‌آپارتمان مسکونی انجام گرفت.

پی دیوارهای بتن مسلح جدید.

آرماتورگذاری یکی از دیوارهای جدید بتن مسلح در تراز زیرزمین.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۵۸
کاربری ساختمان	آپارتمان مسکونی
ساکنین	PB = 6
ارزش ساختمان	۳/۶ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده I
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	نوع A
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، بهبود شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۴
هزینه مقاوم‌سازی	۴ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	مشاور Gasser & Masserey در شهر کرانس مونتانا

۳ـ۲۲ هتل شهر بوسینی

وضعیت موجود

هتل نوول در شهر بوسینی (Bussigny) نزدیک لوزان در سال ۱۹۷۲ و در قالب یک ساختمان ۳ طبقه ساخته شده است. این هتل حدود ۷۵ متر طول، ۱۶ متر عرض و ۸ متر ارتفاع دارد. غیر از طبقه زیرزمین، ساختمان دارای فضای خزشی و حرکتی به‌ارتفاع حدود ۱ متر است، به‌گونه‌ای که لوله‌های تأسیساتی و مجراها آسیب دیده‌اند.

نمای شمالی ساختمان با پلکان جدید بتن مسلح.

نمای جنوبی ساختمان با پشت‌بندهای بتن مسلح جدید مثلثی.

ضعف سازه‌ای

ساختمان در وضعیت اصلی خود فاقد سیستم مهاربند طولی در قبال بارهای زلزله یا باد می‌باشد. علاوه بر این، تقسیم ساختمان به‌چهار بخش جداگانه به‌واسطه درزهای انبساطی که در کل ارتفاع اجرا شده‌اند، منجر به رفتار نامناسب لرزه‌ای گشته است. علاوه بر این کفایت سیستم تعلیق نماهای سنگین ساختمان از جنس بتن پیش‌ساخته مورد تردید است. در امتداد عرضی، دیوارهای مناسب و کافی بر روی شالوده‌های نواری اجرا شده‌اند.

طرح مقاوم‌سازی

هر دو انتهای ساختمان با استفاده از عناصری در بخش بیرونی تقویت شدند. این تقویت در وجه جنوبی ساختمان با استفاده از دو پشت‌بند بتن مسلح مثلثی و در وجه شمالی با استفاده از پلکان بتن مسلح جدید انجام گرفت. پشت‌بندهای تقویتی بر روی چند شمع تکیه کرده‌اند. درزهای انبساط موجود در کف بتن مسلح طبقات با استفاده از ملات منبسط‌شونده مسدود و آویزهای نمای ساختمان نیز تقویت شدند.

عناصر فولادی T شکل برای مهار دیوارهای بتن مسلح جدید در کف‌های موجود.

عملیات اجرای دو پشت‌بند بتن مسلح مثلثی در نمای جنوبی ساختمان.

مشخصه‌ها

پلکان اجراشده در نمای شمالی ساختمان در طرح حفاظت حریق، به‌عنوان پله فرار نیز کاربرد دارد. درزهای موجود در کف طبقات که در فصل سرد مسدود شدند، باعث اعمال نیروی پیش‌کشش (پیش‌تنیدگی) به‌هر دو دیوار بتنی جدید در دمای معمولی ساختمان خواهند شد.

پیش‌زمینه

طرح مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان در قالب طرح نوسازی کلی هتل و توسعه آن از ۳ به ۴ طبقه انجام گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۲
کاربری ساختمان	هتل
ساکنین	PB = 60
ارزش ساختمان	۲۵ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده I
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع B
ضریب اهمیت وضعیت موجود	a_{eff} = 0.12
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	α_{int} = 1.0
راهکار مقاوم‌سازی	مقاوم‌سازی، بهبود شکل‌پذیری
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۸
هزینه مقاوم‌سازی	۰/۷۲ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	ای. ملیرس و فرانک میلان (مشاور)
گروه معماری	مشاور آکروبات (Acrobat)

۳ـ۲۳ پل بزرگراهی خیابان سیمیلون

وضعیت موجود

پل برونن (Brunnen) در وضعیت اولیه دارای ۵ و ۱۰ دهانه از نوع شاهتیر پیوسته با یک درز انبساط بر روی ستون میانی بوده است. هر دو شاه‌تیر پل در امتداد طولی به‌صورت صلب به‌کوله سمت خود متصل شده‌اند. هر دو شاهتیر در امتداد عرضی نیز به‌پایه‌های تکیه‌گاهی خود مهار گشته‌اند. طول کل پل ۲۷۰ متر، دهانه پل بر روی ستون‌های کوتاه ۱۶ متر و بر روی پایه‌های بلند ۲۶ متر است.

نمای بخشی از پل با پایه‌های بلند و لاغر.

ضعف سازه‌ای

در وضعیت اولیه، تکیه‌گاه‌های طولی ثابت بر روی هر یک از کوله‌های انتهایی قادر به‌تحمل نیروهای لرزه‌ای نبودند. اختلاف زیاد بین ارتفاع پایه‌ها منجر به‌نامنظمی سختی پل در امتداد عرضی شده است و این موضوع باعث اعمال نیروهای قابل توجه به‌پایه‌های کوتاه در هنگام زلزله عرضی می‌گردد. علاوه بر این، خطر عدم تکیه کافی عرشه پل در امتداد طولی و در محل درز انبساط بر روی پایه میانی نیز وجود داشته است.

طرح مقاوم‌سازی

با نصب تکیه‌گاه‌های لرزه‌ای انعطاف‌پذیر (نرم) در امتداد افقی در محل کوله‌ها و در محل پایه‌های بحرانی کوتاه، سیستم تکیه‌گاهی پل در امتداد طولی از شرایط مفصل به‌غلتک تغییر نمود. درز انبساط پل در بخش میانی نیز بسته شد.

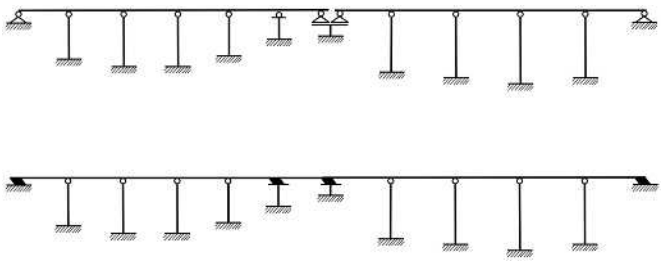
نصب بالشتک‌های لاستیکی با میرایی زیاد در کوله‌ها.

مشخصه‌ها

طراحی سیستم تکیه‌گاهی نرم با استفاده از ۱۶ بالشتک لرزه‌ای لاستیکی با میرایی بالا، باعث افزایش میرایی سیستم و افزایش زمان تناوب و در نتیجه کاهش نیروهای لرزه‌ای وارد بر پل گردید.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای پل بین‌المللی بزرگراه A9 در قالب برنامه ارزیابی، نگهداری و نوسازی عمومی سازه پل، انجام گرفت.



سیستم تکیه‌گاهی مفصل پل در امتداد طولی (شکل بالا)،
سیستم تکیه‌گاهی غلتکی پل بعد از نصب بالشتک‌های لرزه‌ای (پایین).

یکپـارچه نمودن دو نیمـه پل در محل درز انبسـاط موجـود بـر روی دهانه میانی.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۸
کاربری ساختمان	ترافیک سواره
ساکنین	-
ارزش ساختمان	۷ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده II (BWK)
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	نوع A
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$a_{eff} = 0.1$
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$
راهکار مقاوم‌سازی	کاهش سختی، کاهش نیروهای زلزله با افزایش میرایی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
هزینه مقاوم‌سازی	۲ درصد ارزش ساختمان
گروه مهندسی سازه	مشاورهای VWI Ingenieure و Truffer Ingenieurberatung
مشاور عالی	دکتر توماس ونک

۲۴ـ۳ مخزن گاز مایع در ویسپ

وضعیت موجود

مخزن مورد مطالعه یک مخزن فولادی استوانه‌ای با حجم ذخیره ۱۰۰۰ تن گاز مایع است کـه بر روی دال بتنی، با فاصله از زمین، متکـی اسـت. قطـر مخـزن ۱۵ متـر و ارتفـاع آن ۱۶ متـر می‌باشد. دال بتنی بر روی ۲۶ سـتون بـتن مـسلح لاغـر متکـی اسـت کـه هـر یـک ۲/۲ متـر

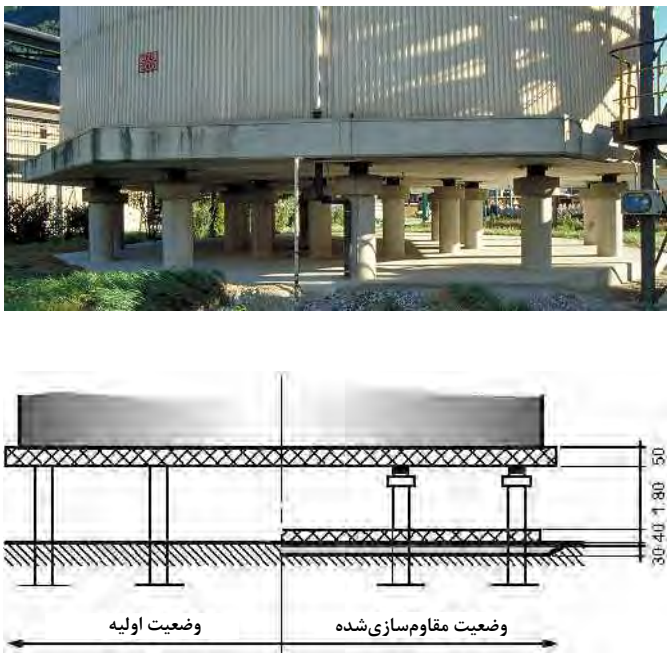
ارتفاع و ۵۰ سانتی‌متر قطر دارند. هر ستون خود بر روی یک شمع بتنی درجاریز به‌همین قطر به‌عنوان شالوده مخزن اجرا شده است.

ضعف سازه‌ای

مخزن گاز مایع به‌جهت حفاظت در مقابل جریان‌های سیلابی در ارتفاع بالاتری از سطح زمین قرار گرفته است. در وضعیت موجود ستون‌ها و شمع‌های شالوده در زیر مخزن، در بارگذاری زلزله تحت نیروهای برشی و خمشی بیش از ظرفیت سازه‌ای خود قرار می‌گیرند. بر همین مبنا، سازه فلزی مخزن نیز تحت اضافه تنش‌های ناشی از بارگذاری افقی زلزله می‌باشد.

طرح مقاوم‌سازی

در این طرح کاهش سختی جانبی سیستم سازه‌ای با استفاده از نصب ۲۶ عدد بالشتک لاستیکی ویژه با میرایی بالا بر بالای ستون‌ها، جایگزین عملیات مقاوم‌سازی گشت. در نتیجه استفاده از جداسازهای لرزه‌ای و تغییر عملکرد کلیه ستون‌ها به‌شرایط غلتکی، فرکانس طبیعی



شرایط اولیه (چپ) و وضعیت بهسازی‌شده (راست) با استفاده از نصب جداسازهای لرزه‌ای و اضافه نمودن دال بتنی در زیر دال اصلی (Bachmann, 2000).

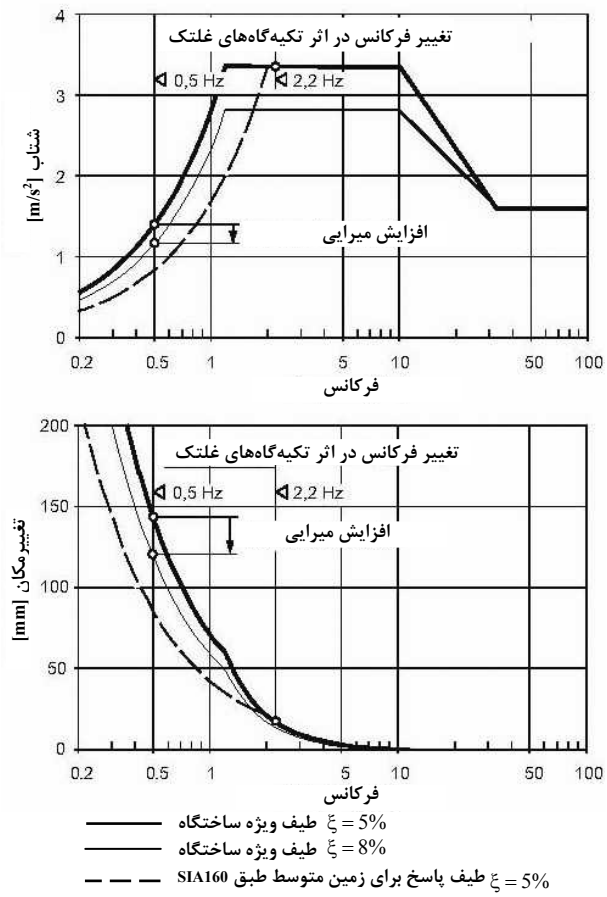
سازه از ۲/۲ هرتز به ۰/۵ هرتز کاهش یافت. کاهش فرکانس طبیعی سازه و همچنین افزایش میرایی، باعث کاهش شتاب طیفی و در مجموع باعث کاهش نیروهای لرزه‌ای به‌یک‌سوم مقدار اولیه گردید.

مشخصه‌ها

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در بالای ستون‌ها، نیروهای لرزه‌ای وارد بر مخزن فلزی را به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد؛ در حالی‌که عملیات مقاوم‌سازی بخش فولادی مخزن برای تحمل نیروهای اولیه مستلزم صرف هزینه زیادی بود. در این راستا برج پلکان دسترسی و سیستم لوله‌کشی متصل به‌مخزن باید برای تغییرمکان‌های جانبی بزرگ ناشی از کاربرد جداسازهای لرزه‌ای کنترل می‌شدند.

پیش‌زمینه

مقاوم‌سازی لرزه‌ای مخزن پیرو تحلیل خطرپذیری آن طبق ضوابط موجود در قبال برخوردهای بزرگ و سنگین انجام گرفت.



تغییرات طیف پاسخ شتاب در طراحی ارتجاعی (بالا) و تغییرمکان (پایین) در مقابل تغییرات فرکانس پایه قبل و بعد از مقاوم‌سازی لرزه‌ای.

مقاوم‌سازی با نصب بالشتک‌های لاستیکی در زیر مخزن فولادی گاز مایع و در بالای ستون‌ها.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۸۰
کاربری ساختمان	مخزن گاز مایع
ارزش ساختمان	۳ میلیون فرانک سوئیس
رده اهمیت ساختمان	رده III
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z3b
نوع زمین	مطالعات ژئوتکنیک و مطالعات دینامیک خاک
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$\alpha_{eff} = 0.2$ (طبق ضوابط SIA)
ضریب اهمیت بعد از بهسازی	$\alpha_{int} = 1.0$ (طبق ضوابط SIA)
راهکار مقاوم‌سازی	کاهش سختی، کاهش نیروهای لرزه‌ای با افزایش میرایی
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۲
هزینه مقاوم‌سازی	۱۲ درصد ارزش اولیه سازه
گروه مهندسی سازه	مشاور KMB
مشاور عالی	پروفسور هوگو باخمن

۳ـ۲۵ ساختمان مسکونی در کریسرن

وضعیت موجود

این ساختمان یک خانه نه‌چندان مشهور خانوادگی با دو طبقه مسکونی، یک زیرزمین و یک اتاق زیرشیروانی است. دیوارهای ساختمان از جنس مصالح بنایی غیرمسلح و کف‌ها از جنس بتن مسلح می‌باشند. ابعاد پلان طبقات معادل ۹ × ۲۳ متر بوده و سیستم سازه ساختمان در برابر بارهای جانبی دارای تقارن در پلان و ارتفاع است.

تناسب و توجیه

مطالعات ایمنی لرزه‌ای، ضریب پذیرش ساختمان را نزدیک به $a_{eff} = 1.0$ به‌دست می‌دهد. بنابراین انجام ارزیابی جهت مقاوم‌سازی، مستقل از ضوابط و معیارهای تناسب و کفایت منطقی سازه طبق پیش‌نویس استاندارد (SIA 2018)، لازم نمی‌باشد.

توصیه تکمیلی

ساختمان موجود در وضعیت فعلی خود از نظر کفایت باربری در برابر نیروهای زلزله قابل قبول است.

پیش‌زمینه

ارزیابی ایمنی لرزه‌ای در هماهنگی با برنامه ارزیابی کلی سازه ساختمان در چارچوب طرح حفاظت و نگهداری آن انجام گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۶۰
کاربری ساختمان	ساختمان مسکونی
ساکنین	PB=10
رده اهمیت ساختمان	رده I
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z2
نوع زمین	نوع D
ضریب اهمیت وضعیت موجود	$a_{eff} = 1.0$
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
گروه مهندسی سازه	شرکت Hoelinger

۳ـ۲۶ کتابخانه مؤسسه ETH زوریخ

وضعیت موجود

ساختمان کتابخانه HPP در خلال سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۱ و به‌عنوان مرحله اول از پردیس هونگربرگ (Honggerberg) متعلق به‌مؤسسه تحقیقاتی ETH زوریخ ساخته شد. ارتفاع ساختمان معادل ۴۵ متر بر روی زمین بوده و دارای ۱۱ طبقه فوقانی و دو طبقه زیرزمین بوده و پلان آن مربعی به‌ضلع ۳۴ متر است. سیستم باربر جانبی ساختمان شامل هسته بتن مسلح آسانسور و پلکان دسترسی می‌باشد که در کل ارتفاع ادامه یافته، همچنین سایر دیوارهای سازه‌ای که مکمل این مجموعه هستند. سیستم باربر سازه‌ای در پلان و ارتفاع نزدیک به‌شرایط منظم است. کف طبقات از بتن مسلح متکی بر تیرچه در اکثر قسمت‌ها می‌باشد. دیوارهای غیرسازه‌ای ساختمان، بنایی هستند.

تناسب و توجیه

ضریب پذیرش، a_{eff}، با فرض عمر مفید باقی‌مانده معادل ۴۰ سال و براساس ضوابط پیش‌نویس استاندارد SIA 2018 به‌مقدار مجاز ضریب کاهش‌یافته a_{adm}= 0.7، به‌دست آمد. بر این اساس نیازی به‌ارزیابی جهت مقاوم‌سازی نمی‌باشد.

توصیه تکمیلی

ساختمان موجود در وضعیت موجود از نظر کفایت باربری در برابر نیروهای زلزله قابل قبول بوده است.

پیش‌زمینه

ارزیابی ساختمان جهت بررسی ایمنی در برابر زلزله در توافق با برنامه ارزیابی کلی سازه ساختمان در چارچوب طرح حفاظت و نگهداری آن انجام گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۱
کاربری ساختمان	کتابخانه و مرکز آموزش
ساکنین	PB=300
رده اهمیت ساختمان	رده I
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	a_{eff} = 0.7
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
گروه مهندسی سازه	گروه مهندسی بازلر و هافمن

۳ـ۲۷ برج اداری SIA در زوریخ

وضعیت موجود

برج اداری مؤسسه مهندسی و معماری سوئیس، SIA ، با ارتفاع ۴۰ متر و با سیستم قاب‌بندی در سال ۱۹۷۱ در شهر زوریخ احداث گردید. سیستم باربر جانبی ساختمان در برابر نیروهای باد و زلزله توسط هسته بتن مسلح با خروج از مرکزیت نسبت به‌مرکز هندسی ساختمان و با

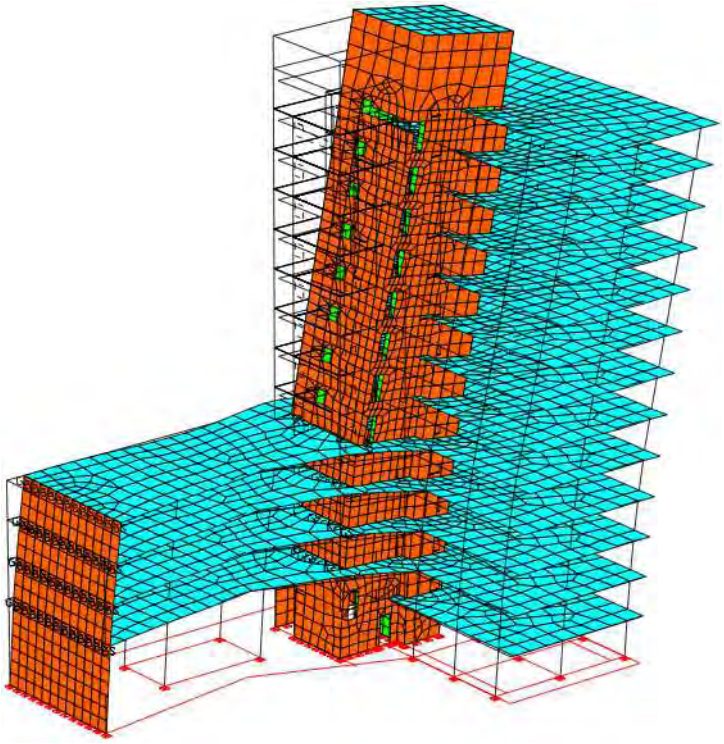
ابعاد ۸ × ۸ متر تأمین شده است. در خلال نوسازی کامل ساختمان در سال‌های ۷ ـ ۲۰۰۶، ساختمان ۴ طبقه اداری نیز به‌صورت یکپارچه به‌برج اصلی متصل شدند تا یک مجموعه ترکیبی بزرگ و یکپارچه حاصل شود. با این طرح، خروج از مرکزیت سیستم مهاربندی ساختمان در طبقات پایین‌تر، تا حدودی کاهش یافت.

تناسب و توجیه

اطمینان از ایمنی لرزه‌ای ساختمان با استفاده از تحلیل طیف پاسخ بر روی مدل سه‌بعدی انجام گرفت. با حصول ضریب پذیرش $a_{eff} > 1$ ، ملاحظات خاصی جهت انجام ارزیابی‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای لازم نبود.

توصیه تکمیلی

بعد از نوسازی ساختمان، مجموعه جدید به‌گونه‌ای در برابر نیروهای لرزه‌ای مقاوم گشت که نیازی به‌عملیات مقاوم‌سازی فراهم نشد.



مدل اجزای محدود سه‌بعدی در تحلیل طیف پاسخ.

پیش‌زمینه

ارزیابی لرزه‌ای ساختمان در قالب طرح بازسازی آن به‌دلیل تغییر کاربری و سیستم اسـتیجاری مجموعه انجام گرفت.

اطلاعات تکمیلی	
زمان احداث ساختمان	۱۹۷۱
کاربری ساختمان	ساختمان اداری
ساکنین	PB=70
رده اهمیت ساختمان	رده I
پهنه‌بندی لرزه‌ای	پهنه Z1
نوع زمین	نوع C
ضریب اهمیت وضعیت موجود	a_{eff}>1.0
زمان مقاوم‌سازی	۲۰۰۵
گروه مهندسی سازه	دکتر لوچینگر و مشاور مهندسی Meyer

پیوست‌ها

پیوست الف: توسعه دستورالعمل لرزه‌ای در آیین‌نامه‌های مختلف

اصطلاح منظم لرزه‌ای برای اولین بار در ادبیات فنی کشور سوئیس در سال ۱۹۷۵ و در استاندارد سوئیس (SIA 160 - 1970) مطرح شد. در دو ویرایش بعدی این آیین‌نامه در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۳، در هر نوبت ضوابط مربوطه سخت‌گیرانه‌تر شدند که علت آن پیشرفت دانش فنی در حوزه مهندسی زلزله و لرزه‌نگاری بود.

طبق ضوابط آیین‌نامه‌های اصلی (SIA 260 و موارد وابسته آن تا سال ۲۰۰۳)، آثار لرزه‌ای که به‌عنوان نیروهای زلزله در طراحی سازه‌ها لحاظ می‌گردد، متناسب با عوامل مختلف بسیار متغیر است. ۵ عامل تأثیرگذار در این موارد عبارتند از:

- رده اهمیت
- منطقه لرزه‌ای
- نوع زمین
- سیستم سازه‌ای
- رفتار دینامیکی سازه

ترکیب این عوامل بزرگی نیروهای لرزه‌ای مورد استفاده در طراحی سازه را تعیین می‌کند. جدول الف ـ ۱ نشان می‌دهد که چگونه اثر و اهمیت این عوامل در نسخه‌های مختلف استانداردها توسعه یافته و تغییر کرده‌اند.

جدول الف ـ ۱ توسعه عوامل مرتبط با تعیین نیروهای زلزله در استاندارد SIA

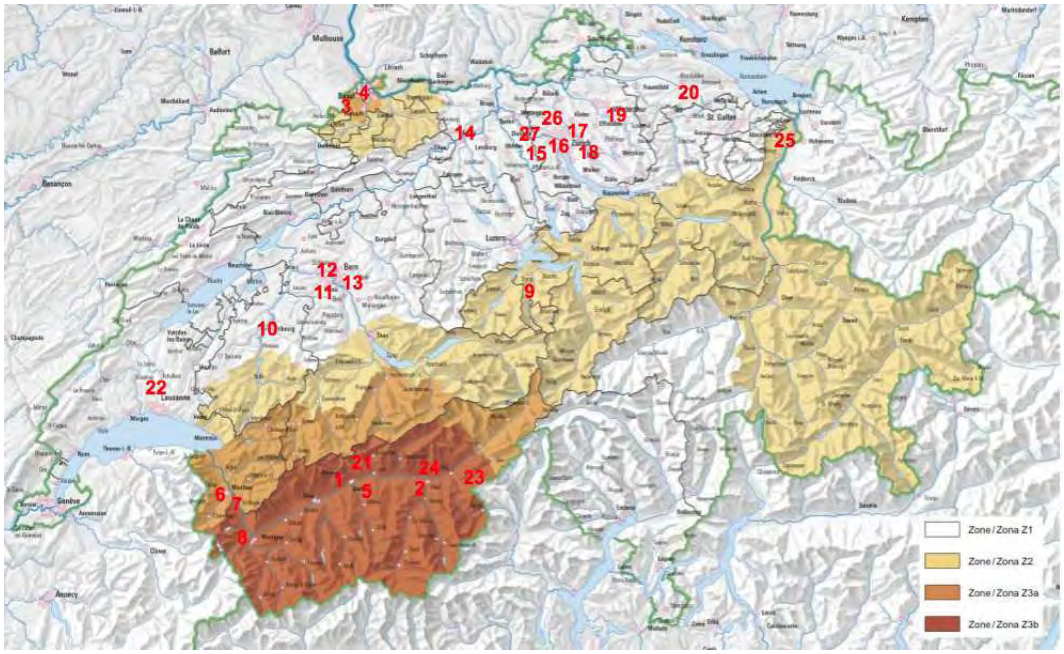
ویرایش استاندارد	SIA 160	SIA 160	SIA 260 و موارد وابسته
زمان اعمال تغییر	۱۹۷۰	۱۹۸۹	۲۰۰۳
تعداد رده‌های سازه	۲	۳	۴
تعداد نواحی لرزه‌ای	۱	۴	۴
تعداد انواع زمین	ـ	۳	۶
تعداد انواع سیستم سازه	۱	۵	۲۷
رفتار دینامیکی	لحاظ نشده	لحاظ نشده	لحاظ نشده

مبنای دسته‌بندی ساختمان‌ها در سه رده اهمیت (IC)، عبارت از متوسط تعداد ساکنین، پتانسیل خرابی و آسیب به‌ساختمان، پتانسیل آسیب به‌محیط اطراف و اهمیت سازه در مدیریت بحران بلافاصله بعد از وقوع زلزله است. در این راستا ساختمان‌های منظم مسکونی و تجاری در رده I قرار می‌گیرند. ساختمان‌های محل تردد و ازدحام افراد (فروشگاه‌های بزرگ، سالن‌های ورزشی، سالن‌های سینما، تئاتر، مدارس و کلیساها) و همچنین ساختمان‌های ادارات دولتی در رده II طبقه‌بندی می‌شوند. تأسیسات اصلی یا شریان‌های حیاتی که عملکرد مهمی در ارائه خدمات زیرساختی یک شهر یا منطقه دارند، نظیر ایستگاه‌های آتش‌نشانی، پارکینگ و محل استقرار آمبولانس‌ها و بیمارستان‌های اورژانسی (با خدمات فوری) در رده III قرار می‌گیرند. بزرگی نیروهای زلزله مورد استفاده در طراحی انواع سازه‌ها و ساختمان‌ها با رده‌های اهمیت متفاوت متناسب با اعمال ضریب اهمیت $\gamma_f = 1$ برای رده I، $\gamma_f = 1.2$ برای رده II و $\gamma_f = 1.4$ برای سازه‌های رده III تعیین می‌شوند. همچنین دوره بازگشت زلزله طراحی برای ساختمان‌های رده I، معادل ۴۷۵ سال و برای سازه‌های رده II و III معادل ۱۲۰۰ سال تعیین شده است.

در استاندارد SIA 160 و از سال ۱۹۷۰، دو رده اهمیت برای ساختمان‌ها، با ضریب اهمیت ۱/۴۰ برای رده بالاتر، در تعیین نیروهای زلزله تعریف شده بود که به‌ساختمان‌های محل ازدحام و تجمع (سالن‌های تئاتر، کلیسا، بیمارستان و مدرسه) اختصاص داشت. استاندارد SIA 160 از سال ۱۹۸۹ ساختمان‌ها را به‌سه رده اهمیت تقسیم نمود و دو روش تعیین نیروهای زلزله برای این سه رده مطابق نسخه فعلی استاندارد یعنی SIA 216 (2003) ارائه شده است.

امروزه کشور سوئیس طبق شکل پ ـ ۱ به‌چهار ناحیه لرزه‌ای تقسیم شده است. در منطقه آلپ و اطراف شهر بازل خطر زلزله بیش از مناطق ژورا، مناطق مرکزی و ناحیه تسین است. در مقایسه با پهنه‌بندی کلیه مناطق دنیا، وضعیت کشور سوئیس حد فاصل زلزله‌خیزی کم تا متوسط قرار دارد. حداکثر شتاب افقی زمین در نواحی سنگی (زمین نوع A) در منطقه کم‌خطر Z1 معادل $0/6\ m/s^2$ است. این شتاب در ناحیه Z2 معادل $1\ m/s^2$، در ناحیه Z3a معادل $1/3\ m/s^2$ و $1/6\ m/s^2$ در ناحیه Z3b با بالاترین خطر زلزله است.

در استاندارد SIA 160 و از سال ۱۹۷۰ سطح خطر واحدی با شتاب افقی $0/2\ m/s^2$ تعریف شده بود که به‌همه مناطق کشور سوئیس نیز اعمال می‌شد. تنها در منطقه کانتون از استان بازل این شتاب معادل $0/5\ m/s^2$ تعریف شده بود. استاندارد SIA 160 در سال ۱۹۸۹ چهار ناحیه لرزه‌ای با مقادیر مشخص شتاب افقی را تعریف نمود، لیکن مرز جغرافیایی ناحیه با خطر لرزه‌ای بالا نسبت به‌استاندارد فعلی SIA 261 کوچکتر بود.



شکل الف ـ ۱ نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی کشور سوئیس.

استاندارد SIA 261 (2003) کشور سوئیس را به‌چهار پهنه لرزه‌خیز تقسیم‌بندی می‌کند.

در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی نسبی، شدت زلزله متناسب با شرایط محلی زمین در ساختگاه یک پروژه، از نقطه‌ای به‌نقطه دیگر متغیر است. به‌طور کلی هر چقدر بستر ضعیف‌تر باشد، شدت تحریک زلزله قوی‌تر و تعدد تکرار آن کمتر است. استاندارد SIA 261 شامل ۵ نوع زمین از A تا E با نیروهای لرزه‌ای متفاوت و همچنین زمین نوع F برای خاک‌های آلی یا حساس به‌سازه است که برای طراحی در این نوع زمین‌ها به‌مطالعات دینامیک ویژه ساختگاه نیاز می‌باشد (جدول الف ـ ۲).

در استاندارد SIA 160 سال ۱۹۷۰ هیچ نوع تقسیم‌بندی برای انواع زمین‌ها وجود نداشت. این استاندارد از سال ۱۹۸۹ طیف بازتاب‌های مختلفی برای دو نوع زمین (زمین سخت و زمین متوسط تا سخت) معرفی کرده است. برای زمین‌های سخت با تحکیم‌یافتگی ضعیف و نهشته‌های یخرفت، مطالعات ویژه ساختگاه برای تعیین طیف طراحی و مقادیر طیفی (سرعت و شتاب طیفی) لازم است.

جدول الف ـ ۲ طبقه‌بندی انواع زمین در استاندارد SIA

طبقه‌بندی نوع زمین طبق SIA 160 (1989)		طبقه‌بندی نوع زمین طبق SIA 261 (2003)	
سفت	سنگ، شن متراکم و یخ‌رفت، شن و ماسه متراکم با سرعت موج برشی بزرگتر از 800 m/s در زیر حداکثر ۱۰ متر لایه سنگ سست	A	سنگ سخت (گرانیت، گنایس، کوارتز، سنگ سلیتی سخت، سنگ آهک) یا سنگ‌های نرم‌تر (گل‌سنگ، کنگلومرا، مارن، اس اُپالینوس) در زیر حداکثر ۵ متر لایه سنگ سست.
		B	نهشته‌های شن و ماسه شدیداً سیمانته شده یا لایه‌های سنگ سست نامساعد با ضخامت کمتر از ۳۰ متر
نیمه‌سفت	لایه سیلت سست تا نیمه‌متراکم، ماسه، شن و رس نیمه‌سفت تا سفت با ضخامت بیش از ۱۰ متر	C	نهشته‌های شن و ماسه غیرسیمانته و عادی تحکیم‌یافته یا مارن با ضخامت بیش از ۳۰ متر
		D	نهشته‌های ماسه ریز تحکیم‌نیافته، رس و سیلت با ضخامت بیش از ۳۰ متر
		E	لایه‌های آبرفت سطحی از خاک‌های گروه C و D با ضخامت بین ۵ تا ۳۰ متر بر روی لایه سختی از گروه A یا B
ضعیف	خاک‌های نرم بدون نهشته‌های منجمد بدون تحکیم‌یافتگی زیاد، نظیر سنگ آهک و رس با ضخامت بیش از ۱۰ متر	F	ساختارهای حساس و نهشته‌های آلی (مانند لجن، گل‌سنگ و خاک‌های زمین لغزش) با ضخامت بیش از ۱۰ متر

در استاندارد فعلی SIA 261 (2003) اختلاف بین تحریک لرزه‌ای در نواحی با فرکانس پایین برای زمین‌های مختلف، ولی در یک پهنه‌بندی لرزه‌ای، می‌تواند به‌بزرگی اختلاف مشخصات لرزه‌ای در چهار پهنه‌بندی لرزه‌خیزی کشور سوئیس باشد. بنابراین نیروی زلزله برای سازه‌ای در ساختگاهی با خاک سست ولی در منطقه لرزه‌ای Z1 می‌تواند مشابه نیروی زلزله وارد بر سازه‌ای مستقر بر ساختگاه سنگی، اما در پهنه لرزه‌ای Z3b باشد.

برای تعیین نوع زمین یک ساختگاه طبق ضوابط استاندارد SIA 261 می‌توان به‌نقشه پهنه‌بندی نوع زمین در وب‌سایت اداره فدرال محیط زیست کشور سوئیس به‌نشانی www.bafu.admin.ch/erdbeben مراجعه نمود. در این سایت می‌توان زبان را به‌انگلیسی تغییر داد.

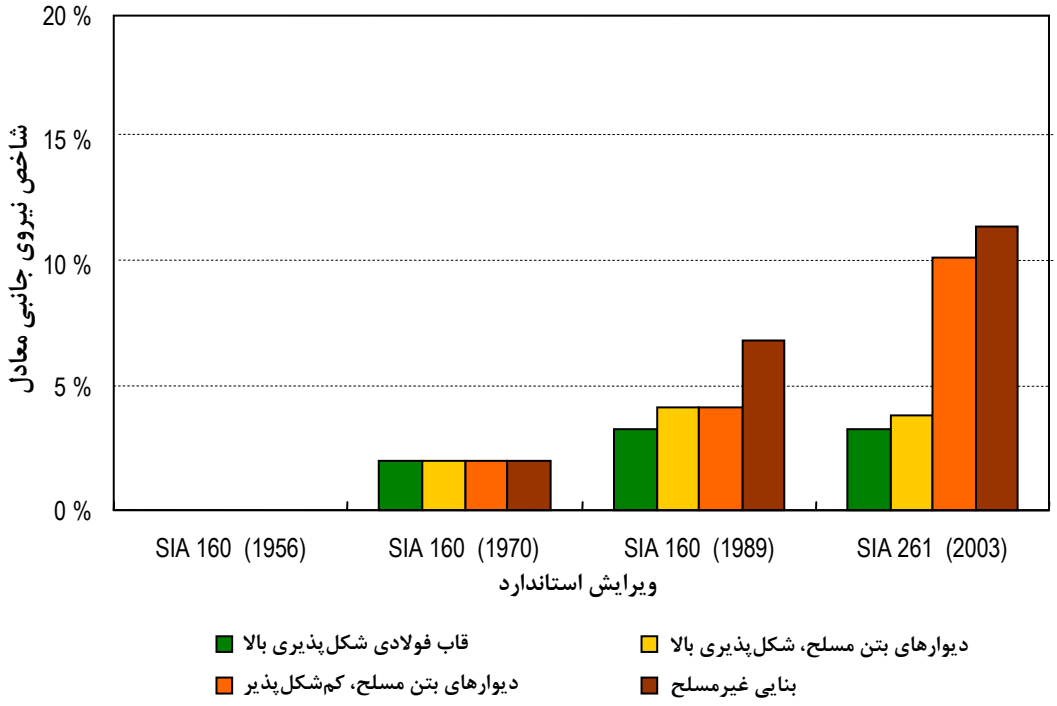
مهمترین عامل مؤثر بر اندازه نیروهای لرزه‌ای وارد بر سازه، سیستم سازه‌ای و رفتار دینامیکی سازه می‌باشند. هر دو عامل فوق‌الذکر به‌واسطه پیشرفت‌های حاصل شده در دانش زلزله، تغییرات زیادی در ویرایش‌های مختلف استانداردهای لرزه‌ای داشته‌اند.

در حالی‌که مقدار نیروهای لرزه‌ای در اولین نسخه از استاندارد SIA در سال ۱۹۷۰ برای انواع سیستم‌های باربر سازه‌ای یکسان بود، متناسب با پیشرفت شناخت رفتار شکل‌پذیر انواع

سیستم‌های مهاربندی، اختلاف بین نیروهای محاسباتی در نسخه‌های بعدی استاندارد معنی بیشتری پیدا کرد، (شکل الف ـ ۲).

شکل الف ـ ۲ مقایسه‌ای است بین شاخص نیروی جانبی وارد بر سازه که در واقع، ارتباط بین نیروی لرزه‌ای جانبی وارد بر سازه و وزن مؤثر ساختمان است را نشان می‌دهد. این مقایسه بین نیروی محاسباتی طبق ضوابط ۴ ویرایش اخیر استاندارد و برای سیستم‌های سازه‌ای مختلف انجام شده است.

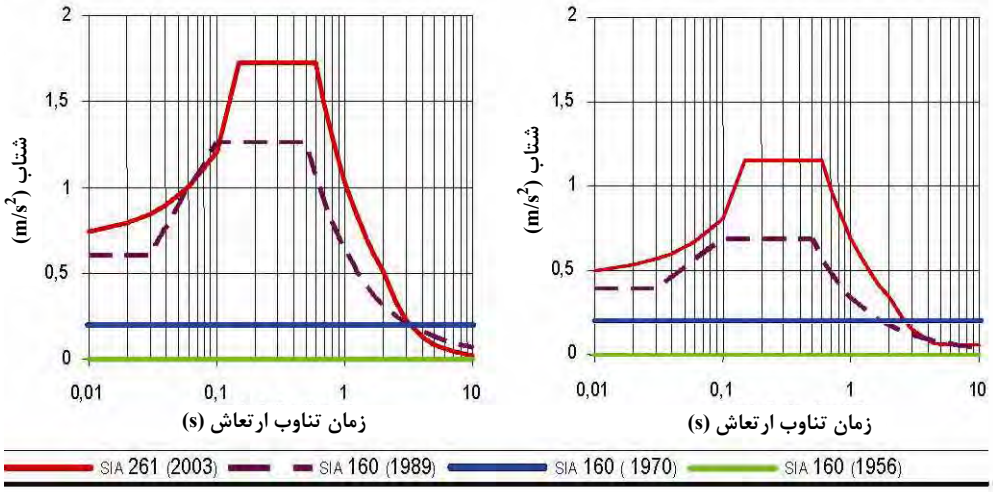
به‌عنوان مثال محاسباتی، این نمودار برای یک ساختمان صلب جانبی در پهنه Z1 مستقر بر خاک نوع C با زمان تناوب پایه ارتعاش در محدوده شتاب حداکثر طیف طراحی، تنظیم شده است.



شکل الف ـ ۲ مقایسه نیروی لرزه‌ای وارد بر ساختمان طبق ویرایش‌های مختلف استاندارد SIA

روند توسعه نیروی زلزله طبق ۴ ویرایش آخر استانداردهای SIA برای سیستم‌های سازه‌ای مختلف که با شاخص نیروی جانبی معادل معرفی‌شده که خود درصدی از وزن ساختمان است. این مقایسه برای یک ساختمان مهاربندی‌شده در پهنه Z1 و خاک نوع C انجام شده است.

با مقایسه عمیق‌تر، شکل الف ـ ۳ به‌دست می‌آید که طیف پاسخ شتاب را برای ساختمان‌های بنایی غیرمسلح در پهنه لرزه‌خیزی Z1 بر روی خاک نوع C در ویرایش‌های مختلف استاندارد مقایسه می‌کند. شکل الف ـ ۳ طیف پاسخ را برای رفتار ارتجاعی (سمت چپ) و طیف طراحی متناظر را برای ساختمان بنایی غیرمسلح (سمت راست) نشان می‌دهد. طیف طراحی در مقایسه با طیف پاسخ ارتجاعی کاهش یافته است، زیرا اضافه باربری عضو نسبت به‌مقاومت اسمی، ناشی از اضافه مقاومت مصالح پایه و شکل‌پذیری عضو، می‌تواند در محاسبات لحاظ گردد.



شکل الف ـ ۳ توسعه طیف پاسخ در ویرایش‌های مختلف استاندارد SIA

مقایسه طیف پاسخ شتاب برای رفتار ارتجاعی سازه (چپ) و طیف طراحی ساختمان بنایی غیرمسلح (راست) در پهنه‌بندی ناحیه Z1 و در خاک نوع C (خاک نیمه‌سفت)، در ۴ ویرایش اخیر استاندارد SIA.

جدی‌ترین افزایش در نیروی زلزله در ویرایش‌های جدید استاندارد SIA، در اصل برای دامنه زمان تناوب پایه ارتعاش بین ۰/۱ تا ۲ ثانیه مشاهده شده است. این افزایش اساساً ساختمان مهارشده جانبی بین ۱ تا ۶ طبقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای ساختمان‌های بلندتر با زمان تناوب بزرگتر از ۳ ثانیه، بزرگی نیروی زلزله مقدار کمتری است. علاوه‌بر این، ساختمان‌های بنایی غیرمسلح نیز مشخصاً افزایش قابل توجه نیروی زلزله را تجربه می‌کنند؛ در حالی‌که برای سیستم‌های سازه‌ای انعطاف‌پذیر، نظیر سیستم‌های فولادی یا بتن مسلح و طبق اصول طراحی لرزه‌ای، افزایش در نیروهای محاسباتی زلزله نسبتاً اندک است.

پیوست ب: هزینه عملیات مقاوم‌سازی لرزه‌ای برای مثال‌های نمونه

هزینه عملیات اجرایی مقاوم‌سازی لرزه‌ای به‌طور کاملاً محسوس و قابل توجه برای مثال‌های ارائه‌شده متفاوت و متغیر است. برای مقایسه، هزینه این عملیات برای ۲۴ مثال ارائه‌شده در فصل سوم، در جدول ۳ با روند کاهشی و در قالب درصدی از ارزش اولیه ساختمان (یا هزینه احداث ساختمان) مقایسه شده‌اند.

جدول ب ـ ۱ هزینه عملیات اجرای مقاوم‌سازی لرزه‌ای

هزینه عملیات مقاوم‌سازی لرزه‌ای به‌صورت درصدی از ارزش اولیه ساختمان و با روند کاهشی

سازه	رده اهمیت	پهنه	α_{eff}	α_{int}	هزینه برحسب درصد ارزش اولیه
ساختمان پلیس	III	Z3b	0.2	1.0	29 %
ایستگاه آتش‌نشانی	III	Z3b	0.2	1.0	23 %
مخزن گاز مایع	III	Z3b	0.2	1.0	12 %
مدرسه شبانه‌روزی	II	Z3b	0.15	0.8	11 %
دبیرستان	II	Z1	0.3	1.0	10 %
پردیس آموزشی	II	Z3b	0.16	1.0	7.7 %
ساختمان مسکونی و مرکز خرید	II	Z1	0.5	1.0	7.4 %
ایستگاه زیرزمینی	III	Z3b	0.3	1.0	5 %
مهد کودک	II	Z1	0.1	1.0	4 %
تالار سخنرانی	I	Z3b	0.2	1.0	4 %
ساختمان دولتی	II	Z3b	0.17	0.7	3.5 %
ساختمان مسکونی و تجاری	II	Z3b	0.2	1.0	3 %
مدرسه	II	Z1	0.2	1.1	3 %
ایستگاه رادیویی	II	Z1	0.3	1.0	2.3 %
ساختمان مسکونی در وینترتور	II	Z1	0.2	1.0	2.2 %
پل در بزرگراه A9	II	Z3b	0.1	1.0	2 %
ایستگاه آتش‌نشانی	III	Z3b	0.4	1.0	1.8 %
ساختمان دولتی	II	Z1	0.25	1.0	1.5 %
هتل	I	Z1	0.12	1.0	0.7 %
مدرسه شبانه‌روزی	II	Z1	0.24	0.6	0.7 %
دبیرستان نئوفیلد	II	Z1	0.1	0.5	0.7 %
مرکز موسیقی در زوریخ	II	Z1	0.25	1.0	0.7 %
سالن چندمنظوره	II	Z2	0.1	1.0	0.5 %
ساختمان دولتی در برن	II	Z1	0.1	(1.0)	0.4 %

محدوده هزینه‌ها بین ۰/۴ تا ۲۹ درصد ارزش اولیه ساختمان‌ها متغیر است. جدول ب ـ ۱ با ۳ ساختمان با رده اهمیت IC III و در دو پهنه لرزه‌خیز بالا و به‌عبارت دیگر، سازه‌هایی با بیشترین نیروی لرزه‌ای طبق استاندارد کشور سوئیس آغاز شده است. در صورت طبقه‌بندی سازه برحسب درجه اهمیت و پهنه‌بندی لرزه‌ای ساختگاه، محدوده هزینه عملیات مقاوم‌سازی آنها طبق تجربیات ارائه‌شده به‌شرح زیر خلاصه می‌شود:

رده اهمیت	III	در پهنه	Z3b	: ٪ ۲۹ ـ ۲
رده اهمیت	III	در پهنه	Z3b	: ٪ ۵ ـ ۲
رده اهمیت	II	در پهنه	Z3b	: ٪ ۳ ـ ۲
رده اهمیت	II	در پهنه	Z3b	: ٪ ۱۱ ـ ۳/۵
رده اهمیت	II	در پهنه	Z2	: ٪ ۰/۵
رده اهمیت	II	در پهنه	Z1	: ٪ ۱۰ ـ ۰/۴
رده اهمیت	I	در پهنه	Z3b	: ٪ ۴
رده اهمیت	I	در پهنه	Z1	: ٪ ۰/۷

محدوده‌های فوق حاکی از آن است که هزینه‌ها به‌مقدار زیادی، به‌نوع عملیات اجرایی در مقاوم‌سازی لرزه‌ای وابسته است تا شدت نیروی زلزله محاسباتی. مواردی که دارای هزینه‌های قابل قبول و متعادلی هستند، به‌مواردی محدود می‌گردند که تداخل عملیات سازه‌ای و اجرایی در آنها کمتر بوده است؛ به‌عنوان مثال مواردی نظیر مسدود نمودن درز انبساط یا اضافه کردن عناصر بادبندی تنها در یک طبقه ساختمان. در شرایطی که عناصر تقویتی در همه طبقات ساختمان لازم باشد، هزینه عملیات اجرایی حتی در پهنه Z1 نیز به‌طور قابل توجه افزایش می‌یابد، به‌خصوص اگر مقاوم‌سازی اضافه‌ای برای شالوده ساختمان نیز لازم باشد.

واژه‌نامه

رده اهمیت (IC):
گروه‌بندی ویژه ساختمان‌ها طبق استاندارد SIA261 برمبنای خطر عامل یکسان برای ساکنین، اهمیت سازه برای منافع ملی و خطر تهدید محیط زیست ناشی از آسیب یا تخریب ساختمان.

شکل‌پذیری:
معیاری از استهلاک انرژی و ظرفیت تغییرشکل خمیری عضو سازه‌ای، برای تغییرمکان یا تغییرشکل سازه‌ای به‌صورت نسبت مقدار حداکثر به‌مقدار متناظر در شروع ناحیه خمیری تعریف می‌شود.

ضریب پذیرش (a_{eff}):
معیار عددی که نشان می‌دهد سیستم سازه‌ای موجود به‌چه میزان نیازهای محاسباتی سیستم‌های جدید آیین‌نامه‌ای را تأمین می‌کند.

خطرپذیری انفرادی:
معیاری از خطر محتمل برای یک فرد که به‌صورت احتمال کشته شدن یک فرد در یک سال تعریف می‌شود.

منحنی ظرفیت:
نمودار تغییرات نیروی ذخیره‌شده در سیستم یک‌درجه آزادی در مقابل تغییرمکان نسبی.

تعداد ساکنین:
متوسط تعداد افرادی که در یک سازه یا در نواحی متأثر از آن ساکن هستند.

هزینه نجات زندگی:
معیاری از هزینه‌های افزایش ایمنی و کاهش خطرپذیری که به‌صورت رقم هزینه‌شده براساس فرانک سوئیس به‌ازای نجات یک نفر تعریف می‌شود.

ظرفیت تغییرشکل:

میزان تغییرشکل عضو یا سیستم سازه‌ای که می‌تواند تا قبل از گسیختگی یا انهدام آن عضو یا سیستم سازه‌ای، اتفاق بیفتد.

تناسب:

تضمین بازده عملیات (طرح) برای کاهش خطرپذیری کل بر مبنای محدود نمودن کیفی خطرپذیری انفرادی.

معقول بودن:

تضمین بازده طرح با کاهش کمی خطرپذیری انفرادی.

نوارهای CFRP :

نوار پلیمر مسلح به‌الیاف کربن.

SIA :

جامعه مهندسی و معماری سوئیس.

منابع

Bachmann H., Wenk T. 2000:
Softening Instead of Strengthening for Seismic Rehabilitation, Structural Engineering International 1/2000, Zurich.

Bachmann H. 2007a:
Erdbeben mit speziellen Lagern sanft bändigen, Neue Zürcher Zeitung, Forschung und Technik, Nr. 295, 19. Dezember 2007.

Bachmann H. 2007b:
Erdbeben im Glattalgraben?, Heimatbuch Dübendorf 2007, 83–94.

Bachmann 2007c:
Ist unser Haus erdbebensicher? Faltblatt der Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen, Dübendorf, und des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern.

Bachmann H., Zachmann A. 2008:
Schwimmende Lagerung. Tec21, Heft 35/2008 26–28, Zürich.

BFS 2004:
Eidgenössische Volkszählung 2000: Gebäude, Wohnungen und Wohnverhältnisse. Bundesamt für Statistik , Neuchâtel.

Borgogno W. 2001:
Erdbebenertüchtigung eines Hochhauses. Tec21, Schweizer Ingenieur und Architekt (SI+A), Nr. 36, Zürich.

BWG 2005a:
Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude – Konzept und Richtlinien für die Stufe 1 (2. Fassung). Wegleitung des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG), Biel, www.bafu.admin.ch/erdbeben.

BWG 2005b:
Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude – Konzept und Richtlinien für die Stufe 3. Wegleitung des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG), Biel, www.bafu.admin.ch/erdbeben.

BWG 2006:
Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude – Konzept und Richtlinien für die Stufe 2 (2. Fassung). Wegleitung des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG), Biel, www.bafu.admin.ch/erdbeben.

EFD 2008:
Weisungen zur Erdbebenvorsorge bei Mitgliedern der Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes (KBOB) vom 18. Januar 2008. Eidgenössisches Finanzdepartement, Bern.

Eurocode 8 2005:
Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. European Standard EN 1998-3, Brussels.

Favre R. 1971:
Baubeschreibung des SIA-Hauses – Bauingenieurprobleme. Schweizerische Bauzeitung, Vol. 89, Heft 25, Zürich.

Garcia-Vogel R. 2005:
Bâtiments en béton armé des années 60 UNIP – Sion. Journée d'étude: Sécurité parasismique des bâtiments: aspects techniques, juridiques et bancaires", Sion.

Koller M.G. 2000:
Beispiele zur Anwendung der Kapazitätsbemessung für die Erdbebenertüchtigung von Gebäuden. SIA-Dokumentation D0162, Erdbebenvorsorge in der Schweiz, Massnahmen bei neuen und bestehenden Bauwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Koller M.G., Vögtli H., Schwegler G. 2008:
Verstärktes Unterwerk. Tec21, Heft 35/2008 29–31, Zürich.

Lateltin E. 2003:
Assainissement du complexe de Beauregard-Centre Fribourg. Documentation du colloque fribourgeois sur le génie parasismique, le 5 novembre 2003. ECAB, Fribourg.

Paulay T., Priestley M.J.N. 1992:
Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, Chichester.

Peruzzi R., Schmid A. 2007:
Renforcer en transformant, Tracés, Bulletin technique de la Suisse romande, No 2/2007, Ecublens VD.

Schefer R., Zwicky P., Santschi R. 1995:
Verstärkung eines grossen Hörsaalgebäudes, Schweizer Ingenieur und Architekt (SI+A), Nr. 43, Zürich 1995.

SIA 160 1970:
Norm SIA 160: Normen für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

SIA 160 1989:
Standard SIA 160: Actions on structures. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.

SIA 260 2003:
Standard SIA 260: Basis of structural design. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.

SIA 261 2003:
Standard SIA 261: Actions on structures. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.

SIA 2018 2004:
Pre-Standard SIA 2018: Examination of existing buildings with regards to earthquakes. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.

SIA D 0211 2005:
Dokumentation SIA D 0211: Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben. Einführung in das Merkblatt SIA 2018. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Truffer Ph., Fischli F., Rosati F., Berset Th., Schwegler G. 2004:
Sicherung mit vorgespannten CFK-Lamellen. Baublatt Nr. 29, Rüschlikon ZH.