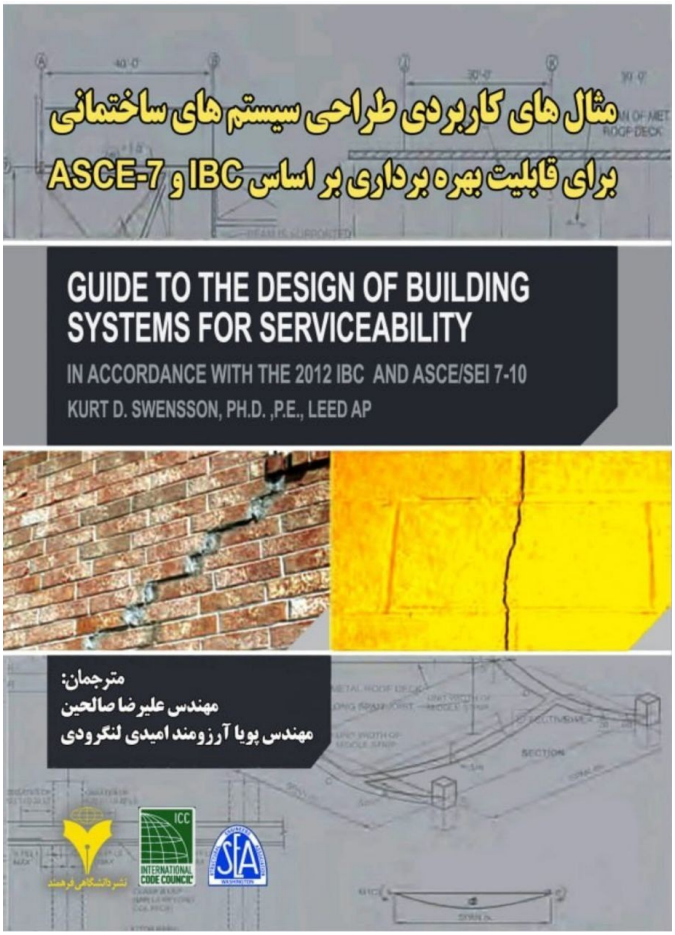
مثال های کاربردی طراحی سیستم های ساختمانی برای قابلیت بهره برداری بر اساس IBC و ASCE-۷



مؤلف: کرت سوینسون

Kurt D. Swensson PhD. P.E. LEED AP

مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس پویا آرزومند امیدی لنگرودی

نشر دانشگاهی فرهمند

نام کتاب: مثال های کاربردی طراحی سیستم های ساختمانی برای قابلیت بهره برداری بر اساس IBC و ASCE-۷

مؤلف: کرت سوینسون

مترجمان: مهندس علیرضا صالحین مهندس پویا آرزومند امیدی لنگرودی

ویراستاران: مهندس بهزاد نادرخانی / مهندس امیر زینی / نیلوفر زینی / علیرضا محسنی فخز / علی حیدری

سال چاپ: ۱۴۰۳

نوبت چاپ: اول

شمارگان: ۱۰۰

شابک: ۵-۱۷-۴۹۸۰-۶۲۲-۹۷۸

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهمند محفوظ می‌باشد

نشانی: تهران، خیابان انقلاب، روبروی در اصلی دانشگاه، پاساژ فروزنده، طبقه اول، واحد ۴۱۹

تلفن: ۶۶۹۶۸۶۱۴- ۶۶۴۱۰۶۸۸

تقدیم نامه مهندس علیرضا صالحین:

با کمال احترام و تشکر، تقدیم به قیام الله علی حسین سعادت جنگل کار ۸۲ ساله قهرمان کوهستان‌های کامفیروز، مردی که ۷۰ سال بی هیچ داشتی درخت می کارد سر تعظیم و احترام فرود می آوریم بر مردی زحمتکشی که تک و تنها و فقط با یک الاغ، بیش از ۲۰۰۰ هکتار از جنگل های کامیفیوز را احیاء نمود. نمونه واقعی یک قهرمان گمنام و بی ادعا

این کتاب را با دل و جان تقدیم حضورتان می‌کنم؛ تقدیمی از ارادت و سپاسی عمیق نسبت به عشق بی‌پایانتان به طبیعت و حفظ زمین مادری. داستان زندگی و تلاشتان، الهام‌بخش نسل‌هاست؛ از کوه‌های حسین قلی خان تا دشت‌های دلنشین روستای ده کهنه، شما با صبر و پشتکار هر قطره عرق خود، بذر امید و زندگی را در دل خاک پدید می‌آورید.

امیدوارم این تقدیم‌نامه، به عنوان نمادی از قدرشناسی جامعه و من، گواه عشقی باشد که به طبیعت داریم و همیشه به یادگار بماند.

با احترام و ارادت فراوان، مهندس علیرضا صالحین

زمستان ۱۴۰۳

تقدیم نامه مهندس پویا آرزومند امیدی لنگرودی:

تقدیم به

تمامی پدران و مادرانی که با عشق و فداکاری بی‌پایان، لحظه‌ای از تلاش برای رشد و شکوفایی فرزندان خود فروگذار نمی‌کنند و با دستانی سرشار از مهر، آینده‌ای روشن را برای ستون‌های فردای این سرزمین رقم می‌زنند.

به اساتید فرهیخته‌ای که با شرافت علمی و مسئولیتی سنگین، نه تنها وظیفه انتقال دانش را به دوش می‌کشند، بلکه با دلسوزی و تعهد، مسیر درخشانی را برای دانشجویان خود ترسیم می‌کنند.

شما که با هدایت خردمندانه خود، الهام‌بخش نسل‌های آینده هستید و چراغی فروزان در راه دانش و پیشرفت.

و سرانجام، تقدیم به مهندسان پرتلاش و بی‌ادعایی که با وجود تمام چالش‌ها و دشواری‌ها، با امید و انگیزه‌ای وصف‌ناپذیر به پیشرفت و توسعه حرفه خود ادامه می‌دهند. شما که با همت و اراده، علم و تجربه را به هم پیوند می‌زنید و سازه‌های پایدارتر و ایمن‌تری برای جامعه بنا می‌کنید، الگوی استقامت و تعهد هستید. باشد که روزی دریچه‌های بیشتری از دانش و فن‌آوری برایتان گشوده شود و دستاوردهای شما به جهانیان ثابت کند که هیچ مانعی بر سر راه دانش و پیشرفت، بزرگ‌تر از اراده شما نیست.

پویا آرزومند امیدی لنگرودی

(دانشجوی دکتری عمران – سازه)

زمستان ۱۴۰۳

فهرست مطالب:

مقدمه
مترجمان.....٦
درباره نویسنده.....٩
مقدمه نویسنده..... ١٠
مقدمه‌ای بر قابلیت بهره‌برداری.....١٢
فصل اول
الف.١ ساختمان مسکونی – بتن مسلح.....**٥٧**
الف.٢ ساختمان مسکونی– سازه فولادی.....**١١٥**
فصل دوم
ب.١ ساختمان تجاری – بتن مسلح.....**١٥٤**
ب.٢ – ساختمان اداری تجاری – سازه فولادی.....**١٩٩**
فصل سوم
ج. انبار – سازه فولادی و بنایی.....**٢٥١**
فصل چهارم
د. ساختمان اداری تجاری – ارزیابی لرزه‌ای.....**٢٧١**
فصل پنجم
ه. ساختمان مسکونی – فولاد سازه‌ای و چوب.....**٢٧٧**
واژه نامه تخصصی انگلیسی به فارسی.....٢٨٤

مقدمه مترجمان:

همگی مطلع هستیم با وضعیت موجود، چه قدر دسترسی به منابع روز دنیا سخت و مشکل بوده و برای ایرانیان این دسترسی روزبه‌روز هم دشوارتر می گردد. دسترسی به منابع معتبر و کاربردی یکی از نیازهای اساسی مهندسان و دانشجویان است. کتاب Guide to the Design of Building Systems fo Serviceability با ارائه مثال های متنوع و کاربردی برای قابلیت بهره برداری (سرویس دهی) ساختمان های متداول، یکی از معدود منابع برجسته در این حوزه است. این کتاب باهمکاری گروهی از نویسندگان به سرپرستی Timothy W. Mays و قلم Kurt D. Swensson تهیه و توسط انتشارات معتبر ICC (International Code Council) منتشرشده است. انتشارات ICC به‌عنوان یکی از ناشران پیشرو درزمینه استانداردهای ساختمانی و مهندسی، همواره تلاش کرده است تا با ارائه منابع جامع و به‌روز، نیازهای مهندسان را در سطح بین‌المللی برآورده سازد.

معیارهای قابلیت سرویس‌دهی در مقایسه با الزامات مقاومت و ایمنی در آیین‌نامه‌های ساختمانی کمتر تجویزی هستند. این راهنما بینش‌های دقیقی در مورد قابلیت سرویس‌دهی ارائه می‌دهد و با ارائه مثال‌های عملی برای اعمال معیارهای قابلیت سرویس‌دهی، به مهندسان در طراحی ساختمان‌ها کمک می نماید.

قابلیت سرویس‌دهی بر عملکرد ساختمان در طول زمان تأثیر داشته و بر دوام و راحتی ساکنان ساختمان اثرگذار است. در این منبع، به جنبه‌های مختلف قابلیت سرویس‌دهی، از جمله خیز، ارتعاش و تغییر مکان جانبی در سیستم‌های مختلف ساختمانی، پرداخته شده است. ارزیابی و کنترل مسائل قابلیت سرویس‌دهی با محاسبات و مثال‌های واقعی برای سازه‌های بتنی، فولادی و چوبی بیان شده است. در این کتاب تلاش شده است تا مشکلات رایج قابلیت سرویس‌دهی و راه‌حل‌های مؤثر آن‌ها بیان شده و به آن‌ها پرداخته گردد.

در طی مطالعه این کتاب در مثال های مختلف به موراد مختلفی پرداخته است. بر قابلیت سرویس‌دهی برای درک مفهوم و اهمیت آن در طراحی ساختمان، مروری بر استانداردها و الزامات قابلیت سرویس‌دهی در آیین‌نامه‌های IBC و ASCE ، راهنمایی‌هایی در رابطه با خیزهای مجاز برای اعضای مختلف سازه و محاسبات مرتبط با آن‌ها، کنترل ارتعاش شامل ارزیابی و کاهش ارتعاشات کف به منظور حفظ آرامش ساکنان، کنترل تغییر مکان جانبی و پایداری سازه برای بارهای وارده از باد و زلزله، قابلیت سرویس‌دهی مرتبط با عملکرد پی و تأثیر قابلیت سرویس‌دهی بر عملکرد دیوارها، پنجره‌ها و سایر اجزای پوسته مورد بررسی قرار گرفته است. البته این موضوعات به صورت گسترده و جامع مورد بحث قرار نگرفته‌اند، چرا که در این صورت کتابی خلاصه در حد ۳۰۰ صفحه به ۱۰۰۰ صفحه تبدیل شده و از حوصله خوانندگان محترم خارج می‌گردید.

اگرچه کتاب بیش از یک دهه قدمت دارد، بسیاری از اصول قابلیت سرویس‌دهی که در آن بحث شده است، همیشگی هستند. مفاهیم بنیادی در مورد نحوه واکنش ساختمان‌ها به بارها، اشغال و عوامل محیطی تغییرات اساسی نداشته‌اند. علاوه بر این، در این زمینه کتب بسیار محدودی منتشر شده است و ICC در انتخاب و ترجمه این کتاب نقش اعتباربخشی داشته است.

این کتاب به دلیل محتوای کاربردی و جامع خود، به‌عنوان یکی از منابع اصلی برای آمادگی در آزمون ورودی مهندسی سازه (SE Exam) شناخته می‌شود. آزمون SE به‌عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین آزمون‌های

حرفه‌ای در مهندسی سازه، نیازمند تسلط بر مفاهیم پیشرفته و کاربردی است که این کتاب به‌خوبی به آن‌ها پرداخته است.

از این مراجع آزمون SE، کتب ارزشمند زیر در نشر دانشگاهی فرهمند ترجمه گردیده که برای هر مهندسی سازه و زلزله مطالعه آن ضروری است، به‌خصوص درصورتی‌که نیاز به گذراندن آزمون‌های حرفه‌ای ورود به حرفه در کانادا و آمریکا را داشته باشد، صدالبته که امتحانات نظام‌مهندسی نیز از منابع مشترکی بهره می‌برد:

۱. مثال‌ها و راهنمای طراحی برای نامنظمی‌های متداول در ساختمان‌ها بر اساس IBC و ASCE-۷ در ETABS، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین، مهندس علی حیدری و مهندس پویا آرزومند امیدی لنگرودی

۲. راهنمای طراحی مهار برون صفحه‌ای دیوارها، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس علی حیدری

۳. مثال‌های طراحی کاربردی ساختمان‌ها با جداسازهای لرزه‌ای و میراگرهای ویسکوز (جلد پنجم راهنمای طراحی لرزه‌ای SEAOC)، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس علی‌اکبر خلیلی

۴. مثال‌های طراحی کاربردی دیافراگم‌ها تیر تیغه‌ها و جمع کننده‌های بار در سازه‌های بتنی و فولادی، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس نیما اصغری

۵. رفع ابهامات، همراه با مثال‌های کاربردی بارگذاری لرزه‌ای آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس حمیده سلطانیه

۶. رفع ابهامات، همراه با مثال‌های کاربردی بارگذاری برف بر سازه‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی و ASCE۷-۱۰، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس بهاره بهرامی

۷. رفع ابهامات، همراه با مثال‌های کاربردی بارگذاری باد بر سازه‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی و ASCE۷-۱۰، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس مسعود غیاث الدین

۸. طراحی پلاستیک سازه‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله بر اساس سطح عملکرد، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس احسان عمرانیان

۹. دیتیل ها و طراحی ساختمان‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله با رویکرد رفتارشناسی اعضاء به روش LRFD (مرجع برای بخش آزمون طرح لرزه‌ای سازه‌های فولادی)، مترجمان: مهندس علیرضا صالحین و مهندس علی حیدری

آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران یکی از مهم‌ترین مراجع فنی در طراحی و اجرای ساختمان‌ها در مناطق زلزله‌خیز کشور است. بر اساس ادعای بیان‌شده، این آیین‌نامه بر اساس تحقیقات و مطالعات علمی و فنی به‌روز تدوین‌شده و همواره با توجه به پیشرفت‌های جدید علمی و تجربیات حاصل از زلزله‌های گذشته، به‌روزرسانی می‌شود؛ اما در حقیقت این آیین‌نامه یک ترجمه از روی آیین‌نامه‌های آمریکایی مانند ASCE و اروپا Eurocode است، اما متأسفانه هم ترجمه ناقص است، هم آنکه تفسیر این آیین‌نامه توسط متولی آن بیرون داده نشده، بنابراین هر کس برای خودش تفسیر به رأی می‌نماید، علاوه بر آن در کشورهای لرزه خیز و پیشرفته علاوه بر تفسیر آیین‌نامه، مجموعه راهنمای تکمیلی و مثال‌های طراحی و حتی مجموعه کتب و سیمنارهای کاربردی رفع ابهامات و خطاها رایج برگزار می‌گردد که این امر در ایران به نحو شایسته وجود ندارد.

با توجه به تجربیات و دانش گسترده نویسندگان این کتاب، می‌توان امیدوار بود که خوانندگان بتوانند از این منبع به نحو احسن بهره‌برداری کنند و در پروژه‌های خود به‌کارگیرند. کتب منتشرشده توسط انتشارات ICC ازجمله

منابع اصلی و معتبر در حوزه مهندسی عمران هستند که به دلیل دقت و جامعیت در تدوین، موردتوجه جامعه مهندسی قرارگرفته‌اند. این کتاب به‌عنوان یک راهنمای عملی و تئوریک برای مهندسان و دانشجویان در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله می تواند مورداستفاده قرار گیرد.

از نقاط قوت این کتاب می‌توان به خلاصه بودن، سرراستی و مثال‌محور بودن اشاره نمود، این کتاب مجموعه از مثال‌های ساده‌سازی شده حل‌شده را با سیستم‌های مختلف سازه‌ای مورد طراحی و ارزیابی قرار می‌دهد.

از همکار ارجمندم جناب مهندس آرزومند که در برگردان و ویرایش این اثر ما را یاری نمودند، کمال تشکر را دارم. از حمایت، پشتیبانی جناب آقای علیرضا فرهمندزادگان، مدیر نشر دانشگاهی فرهمند نیز کمال تشکر راداریم. امید است که این کتاب با ترجمه و نشر در ایران، در راستای کمک به ارتقای دانش و توانمندی‌های حرفه‌ای مهندسان و دانشجویان ایرانی نقش مهمی ایفا نماید.

زمانی برای به دست آوردن یک کتاب چقدر که زحمت نمی‌کشیدیم و بعد از تهیه آن به‌صورت کامل یا ناقص چقدر ذوق داشتیم، سپس ما بودیم و دریایی از معادل‌سازی، شک و ابهام برای ترجمه یا درک مطلب... اما امروز با چاپ بیش از ۳۰ اثر ارزشمند در این انتشارات خط‌شکنی بزرگی درزمینه مهندسی عمران و برگردان آثاری که جای آنها در این رشته جایشان خالی بود انجام دادیم. بیش از ۱۰ سال تلاش... بسیاری از این کتب مستقیماً تحت تحریم از ایالات‌متحده بوده که با تلاش و صرف هزینه‌های بسیار آنها را تهیه و ترجمه آن را در اختیار شما عزیزان قراردادیم. حقیقتاً کار ترجمه متون تخصصی، سنگین و دشوار است.

هیچ اثر بی‌نقصی وجود ندارد، لطفاً نقطه نظرات خویش را با نشر دانشگاهی فرهمند، با کانال: farhamandpress@، اینستاگرام: nashr.farahmand@، وب‌سایت: www.farbook.ir و شماره ۶۶۹۶۸۶۱۴-۰۲۱ یا ۰۹۱۲۵۰۱۰۰۳۰ تماس حاصل فرمایید. نحوه ارتباط با مدیر علمی نشر: Alirezasalehin@، سایر منابع از کانال تلگرامی seismicisolation@ که کتابخانه عظیم مهندسی عمران (سازه، زلزله و ژئوتکنیک و ...) می‌باشد، در دسترس و دانلود می‌باشد و عزیزان می‌توانند منابع موردنیاز خود را از آنها تهیه و استفاده نمایند.

مهندس علیرضا صالحین و مهندس پویا آرزومند امیدی لنگرودی – پاییز ۱۴۰۳

درباره نویسنده:

کرت سوئنسون (Kurt Swensson, PhD, PE, LEED AP) یکی از چهره‌های برجسته مهندسی عمران و محیط زیست است. وی مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی عمران دریافت کرده و به عنوان مهندس حرفه‌ای(PE) در ایالات متحده فعالیت می‌کند و دارای گواهینامه LEED AP بوده که نشان از مهارت او در طراحی و اجرای ساختمان‌های سبز و پایدار دارد. در طول دوران حرفه‌ای خود، دکتر سوئنسون همکاری‌های گسترده‌ای با شورای بین‌المللی تدوین آیین نامه آمریکا (ICC) داشته است؛ این سازمان مسئول تدوین و اجرای استانداردهای ساختمانی و ایمنی است. نقش وی در بازبینی و اصلاح این کدها بسیار ارزشمند بوده و به بهبود کیفیت و ایمنی در صنعت ساختمان‌سازی کمک شایانی کرده است.

دکتر Swensson علاوه بر فعالیت‌های اجرایی، به تألیف و مشارکت در چندین کتاب علمی پرداخته است که این آثار در دانشگاه‌ها و مراکز علمی به عنوان منابع مرجع استفاده می‌شوند. او همچنین مقالات علمی متعددی در نشریات معتبر منتشر کرده است که همگی نشان‌دهنده عمق دانش و تسلط وی بر مسائل پیچیده مهندسی سازه و محیط زیست است.

شرکت KSI Structural Engineers که توسط او تأسیس و مدیریت می‌شود، یکی از معتبرترین شرکت‌های مهندسی در زمینه مشاوره و طراحی سازه‌هاست. این شرکت پروژه‌های بزرگی در زمینه زیرساخت‌های شهری و طراحی پایدار را به سرانجام رسانده است. سوئنسون تجربه مدیریت پروژه‌های پیچیده و بزرگ، نظارت بر طراحی سازه‌ها و همکاری با سازمان‌های بین‌المللی را در کارنامه خود دارد. همچنین به عنوان استاد دانشگاه، نقش مهمی در تربیت مهندسان آینده ایفا کرده و دانش و تجربیات خود را به نسل‌های جدید منتقل می‌کند.

مقدمه:

با پیشرفت صنعت طراحی ساختمان به سمت پذیرش کامل طراحی بر اساس مقاومت نهایی و نگاه به طراحی مبتنی بر عملکرد، ضروری است که طراحان درک روشنی از حالت‌های حدی قابلیت بهره‌برداری داشته باشند. با این حال، حرفه مهندسی سازه در برابر استانداردسازی یا وضع قوانین برای طراحی قابلیت بهره‌برداری در ساختمان‌ها مقاومت می‌کند. در نتیجه، عملکرد قابلیت بهره‌برداری به‌طور دقیق در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، در بسیاری از موارد، مسئولیت تعیین حالت‌های حدی مناسب برای طراحی قابلیت بهره‌برداری بر عهده مهندس محاسب[۱] است. وسعت و تنوع اطلاعات مربوط به حدی قابلیت بهره‌برداری، به مهندس آزادی و خلاقیت در توسعه طرح می‌دهد؛ اما نبود استانداردی با آدرس دهی برای کف مطالبات[۲] مورد نیاز برای طراحی قابلیت بهره‌برداری، از یک سو منجر به محافظه‌کاری بیش حد و از سوی دیگر باعث بی‌توجهی می‌شود. علاوه بر این، تنوع نظرات باعث بروز اختلافات غیرضروری میان مهندسان متخصص می‌گردد. این اختلافات و فقدان استانداردی کاربردی[۳] در طراحی قابلیت بهره‌برداری، به سردرگمی در میان مالکان، معماران و پیمانکاران در مورد عملکرد مورد انتظار سیستم‌های سازه‌ای می‌شود. نتیجه نهایی این است که زمان و هزینه به هدر می‌رود زیرا تیم‌های پروژه باید برای هماهنگی و حل اختلافات مربوط به عملکرد غیرقابل قبول عناصر معماری، نازک‌کاری‌ها و تجهیزات ساختمان وقت صرف کنند.

هدف این راهنمای طراحی، ارائه اطلاعات و مثال‌های کاربردی[۴] برای استفاده مهندسین متخصص در طراحی سازه‌ای ساختمان از نظر عملکرد قابلیت بهره‌برداری است. نویسنده امیدوار است که این راهنما به توسعه استانداردی توافقی برای طراحی قابلیت بهره‌برداری منجر گردد. چالش‌های موجود در به‌کارگیری ضوابط آیین‌نامه‌ها و توصیه‌های استانداردهای مرجع به‌وضوح در مسائل نمونه نشان داده شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند.

یکی از ویژگی‌های خاص این راهنما، اتکای تقریباً کامل به آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان (IBC)، تفسیرها و استانداردهای مرجع آیین‌نامه و نشریات است. تاکنون بیشتر منابع موجود در زمینه قابلیت بهره‌برداری بر اساس تحقیقات و گزارش‌های فردی بوده که هدف اصلی آن‌ها پیش‌بینی دقیق رفتار قابلیت بهره‌برداری است. این راهنما، به‌طور خاص محدود به استفاده از اطلاعات موجود در آیین‌نامه IBC و استانداردهای مرجع آیین‌نامه و همچنین تفاسیر آن‌هاست. هر جا مناسب باشد، نویسنده از نشریات خاصی که به‌طور صریح توسط IBC، استانداردهای مرجع آن و تفاسیر آن‌ها استناد شده است، برای تکمیل ضوابط آیین‌نامه استفاده کرده است.

گستره وسیع مصالح، سیستم‌ها و اجزای ساختمانی این راهنما نسبتاً منحصر به فرد است. بیشتر منابع یا راهنماهای مربوط به قابلیت بهره‌برداری به تعداد محدودی از مصالح سازه‌ای، سیستم‌ها/اجزای سازه‌ای، یا حالت‌های حدی قابلیت بهره‌برداری می‌پردازند. این راهنما تلاش می‌کند تا اکثریت مصالح سازه‌ای، سیستم‌ها، اجزا و حالت‌های حدی مواجه شده در طراحی انواع ساختمان‌های رایج را پوشش دهد. این راهنمای طراحی شامل مباحث مربوط به پل‌ها، تأسیسات صنعتی، ساختمان‌های بلندمرتبه، سیستم‌های دهانه بلند یا بارهای خاص ساختمان نمی‌شود. در نهایت، مسائل نمونه ارائه شده در این راهنما به‌صورت جامع و با استفاده از پروژه‌های واقعی ساختمانی ارائه شده‌اند. این قالب شامل ۲۶ مثال از طراحی یا ارزیابی قابلیت بهره‌برداری است

که از بخش‌های مختلف هفت سازه ساختمانی گرفته شده‌اند. با توجه به طیف گسترده مثال‌های آورده شده، مهندس طراح به رویکردی سیستمی جامع برای حل مسائل در بحث قابلیت بهره‌برداری می‌تواند پی ببرد.[۵] ما پیش‌بینی می‌کنیم که این راهنما عمدتاً توسط مهندسین متخصص طراح مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، این راهنما به‌گونه‌ای سازماندهی شده که به‌راحتی توسط اساتیدی که کلاس‌های مبتنی بر سیستم‌های سازه‌ای پیشرفته را تدریس می‌کنند نیز مورد استفاده قرار گیرد. این راهنما توسط سایر افراد در صنعت ساخت‌وساز، مانند معماران و متخصصان حقوقی نیز به‌عنوان مرجعی برای الزامات آیین‌نامه‌ای مربوط به عملکرد قابلیت بهره‌برداری ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

مقدمه‌ای بر قابلیت بهره‌برداری

طراحی تلاشی برای توسعه روشی بهینه، برای برآورده‌کردن یا پاسخ‌گویی به نیازی تعریف‌شده است. برای کسانی در حیطه مشغول می باشند[۶]، این پاسخ‌ها به شکل ساختمان‌ها، پل‌ها یا دیگر سازه‌هایی است که های موردنظر را احاطه و از آن‌ها پشتیبانی می‌کنند. ساختمان‌ها کاربری هایی مانند تجاری، مسکونی و انبار دارند[۷]. یکی از عملکردهای ساختمان، پشتیبانی فیزیکی از افرادی است که به تجارت خود مشغول‌اند، در خود استراحت می‌کنند یا از کنسرت موسیقی لذت می‌برند. ساختمان همچنین پوسته‌ای را برای کنترل محیط اطراف ساکنین فراهم می‌کند. در پایان، ساختمان فضایی با کیفیت تعریف‌شده را ارائه می‌دهد که در آن فعالیت انجام می‌شود. پل‌ها از حمل‌ونقل افراد یا کالا با قطار یا سایر وسایل نقلیه پشتیبانی کنند. برج‌های مراقبت ترافیک هوایی به ناظران ترافیک هوایی این امکان را می‌دهند که هواپیماهای استفاده‌کننده از فرودگاه را ببینند و با آن‌ها در ارتباط باشند. به طور خلاصه، ساختمان‌ها و سازه‌های غیر ساختمانی برای انجام وظایف خاص طراحی و ساخته می‌شوند.

ارزش سازه‌ای مانند ساختمان یا پل، با ویژگی‌های زیر می‌تواند تعیین گردد:

۱. عملکردهایی که از فعالیت‌های موردنظر پشتیبانی می‌کنند چقدر خوب است، ۲. وضعیت فضایی که فعالیت در آن انجام می‌شود، ۳. عمر مفید مورد انتظار سازه که باقی می‌ماند.

هنگامی‌که ساختمان یا سازه دیگر عملکردهای موردنظر خود را نمی‌تواند انجام دهد، "خراب" شده است. در صنعت، اصطلاح گسیختگی زمانی که به سازه‌ای مربوط می‌گردد، معمولاً برای موارد خاصی لحاظ می‌گردد که سازه دیگر بارهای اعمال‌شده توسط استفاده موردنظر از سازه را نمی‌تواند تحمل کند. این نوع گسیختگی به عنوان نقض حالت حدی مقاومت شناخته می‌شود.

بااین‌حال، گسیختگی که مالک یا کاربر سازه تجربه می‌کند به طور متفاوتی ممکن است تعریف گردد. این امکان وجود دارد که گسیختگی سازه را به‌عنوان کاهش قابل‌توجه کیفیت فضای برآمده از جابه‌جایی یا زوال سیستم سازه‌ای تعریف کند. برای نمونه، یک تکنسین آزمایشگاه به ما می‌گفت که سازه پشتیبان آزمایشگاه در صورتی ویران شده است که ارتعاشات گذرا در کف به او اجازه ندهد آزمایش‌های لازم را تکمیل کند. مالک ساختمانی اداری نشان می‌دهد که اگر خیز طبقات، منجر به طبقاتی شود که هم‌سطح نیستند، سازه ساختمان خراب شده است. این واقعیت که طبقات اداری به طور قابل‌توجهی غیرهم‌سطح هستند، مانع از فروش یا اجاره ساختمان با قیمت رقابتی می‌گردد. مالک ساختمان آپارتمانی بیان می‌کند که اگر تعداد و اندازه ترک‌ها در کف و دیوار اتاق های آپارتمان منجر به کاهش سکونت و اجاره‌بها شود، سازه خراب شده است.

حالت حدی که توسط یکی از گسیختگی‌های ذکر شده در بالا نقض می‌شود، حالت حدی قابلیت بهره‌برداری است.

به‌منظور محافظت از ایمنی و رفاه عموم، سازمان‌ها و نهادهای دولتی برای استفاده در طراحی و ساخت سازه های مهم، دستورالعمل‌های حداقلی را توسعه داده‌اند. آیین‌نامه‌ها و استانداردها عمدتاً بر روی حالت حدی مقاومت تمرکز می‌کنند. بااین‌حال، آن‌ها همچنین شامل بخش‌هایی برای محافظت از سرمایه‌گذاری عموم در عملکرد و ارزش باقی‌مانده سازه می‌شوند. این ضوابط مربوط به حالت حدی قابلیت بهره‌برداری است.

هدف از این راهنمای طراحی، ارائه تفسیر و نمونه‌هایی از اجرای ضوابط و الزامات ویرایش ۲۰۱۲ International Building Code® (IBC®) مربوط به قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها است. این راهنما بحث در مورد قابلیت بهره‌برداری را به آن شرایطی که در IBC و استانداردهای خاص مورد اشاره IBC مورد بحث قرار گرفته است، محدود می‌کند. این راهنما بر روی سازه‌های ساختمانی تحت بارهای ثقلی، باد و زلزله تمرکز می‌کند. اگرچه برخی از مفاهیم مورد بحث ممکن است اعمال شوند، اما این راهنما به طور ویژه به قابلیت بهره برداری برای پل‌ها، شتاب‌های برآمده از باد یا ارتعاشات، طراحی برای انبساط یا انقباض یا لغزش اتصال نمی پردازد.

۱. طراحی بر پایه حالات حدی

ویرایش ۲۰۱۰ *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI ۷-۱۰)، حالت حدی را به‌عنوان وضعیتی تعریف می‌کند که فراتر از آن سازه یا عضو برای بهره‌برداری نامناسب می‌گردد و قضاوت می‌شود که دیگر برای عملکرد موردنظر خود مفید نباشد (حالت حدی قابلیت بهره‌برداری) یا ناایمن باشد (حالت حدی مقاومت).

حالت حدی قابلیت بهره‌برداری شامل حداقل سه المان است – بار اعمال‌شده، رفتار سازه و برخی نتایج غیرقابل قبول رفتار سازه‌ای. برای ارزیابی‌پذیرش سیستم سازه‌ای نسبت به حالت حدی قابلیت بهره‌برداری، باید بار و برخی رفتارهای سازه‌ای پیش‌بینی‌شده برآمده از بار و محدودیتی برای آن رفتار تعریف شود.

ارزیابی بهینه و مؤثر حالت حدی قابلیت بهره‌برداری سازه نیازمند تعادلی بین بار اعمال‌شده، رفتار فرض‌شده سازه و معیارهای قابلیت بهره‌برداری است. به‌کارگیری بارگذاری‌های محافظه‌کارانه بر پایه رویدادهای شدید برای تعیین رفتار سازه و سپس مقایسه آن با محدودیت‌هایی که نگرانی‌های کمی را ایجاد می‌کنند یا حداقل قابلیت بهره‌برداری را تضمین می‌کنند، منجر به سازه‌های ناکارآمد، بیش از اندازه محافظه‌کار و گران‌قیمت می‌شود. به طور مشابه، پیش‌بینی‌های رفتار سازه‌ای انجام‌شده با تحلیلی که فرض بر رفتار غیرخطی و مقاطع ترک‌خورده برای سطوح بارگذاری بسیار پایین‌تر از محدوده الاستیک سیستم سازه‌ای دارد، منجر به ارزیابی‌های بیش از اندازه محافظه‌کارانه می‌گردد. در پایان، محدودیت‌های رفتار باید با عملکرد واقعی سیستم‌های درگیر و انتظارات ساکنین ساختمان مطابقت داشته باشد.

۲. بارگذاری‌های قابلیت بهره‌برداری

هنگام تعیین بارهای مناسب برای استفاده در طراحی قابلیت بهره‌برداری یا ارزیابی سازه، موارد متعددی برای بررسی وجود دارد: سطوح بارگذاری مورد انتظار، بارگذاری‌های موردنیاز آیین‌نامه و زمان اعمال بارها. به‌طورکلی، سه سطح بارگذاری مربوط به حالات حدی وجود دارد – نهایی، اسمی و بهره‌برداری.

الف. بارهای نهایی

بارهای نهایی بارهایی هستند که برای طراحی بر پایه مقاومت در IBC استفاده می‌گردند. این بارها به‌عنوان حداکثر بارهایی در نظر گرفته می‌شوند که در طول عمر آن بر روی المان سازه‌ای سیستم ممکن است اعمال گردند. آن‌ها معمولاً با اعمال ضریب بار بیشتر از ۱٫۰ به بارهای اسمی ارائه‌شده در فصل ۱۶ IBC محاسبه می‌شوند.

بارهای باد مشخص‌شده در فصل ۱۶ IBC و محاسبه‌شده با به‌کارگیری فصول ۲۶ تا ۳۰ از ASCE/SEI ۷ فشارهای بار باد نهایی هستند. تفسیر برای فصل ۲۶ ASCE/SEI ۷ تغییر از ویرایش‌های قبلی آیین‌نامه را که ضریب بار ۱٫۶ را برای فشارهای باد برای طراحی بر اساس مقاومت اعمال می‌کرد، مورد بحث قرار می دهد. این امر به دلیل ضریب بار ۱٫۰ اعمال‌شده به مؤلفه نیروی باد در ترکیبات بار طراحی بر اساس مقاومت بخش IBC۱۶۰۵٫۲ آشکار است. بارهای لرزه‌ای مشخص‌شده در فصل ۱۶ با استفاده از۷ ASCE/SEI محاسبه می‌شوند. این بارها نیز در ترکیبات بار بخش ۱۶۰۵ IBC به‌عنوان بارهای نهایی در نظر گرفته می گردند.

ب. بارهای اسمی

بارهای اسمی توسط IBC به‌عنوان بارهای مشخص‌شده در فصل ۱۶ تعریف می‌شوند. این مورد برای بارهای زنده و بارهای برف صادق است؛ اما برای بارهای باد یا لرزه‌ای صادق نیست. بارهای اسمی برای نشان‌دادن حداکثر رویداد محتمل مورد انتظار در طول عمر طراحی سازه در نظر گرفته‌شده‌اند. رایج‌ترین دوره زمانی برای تعیین این حداکثر رویداد محتمل ۵۰ سال است. بارهای زنده اسمی مشخص‌شده در جدول ۱۶۰۷٫۱ IBC (و همچنین جدول ۴٫۱ از ۷ ASCE/SEI) با استفاده از نظرات آگاهانه هیئتی از ۲۵ مهندس سازه برجسته تعیین شده است. بارها مستقیماً از تحقیقات میدانی گسترده و دقیق یا اندازه‌گیری‌ها به دست نیامده‌اند. بارها در هر دوره آیین‌نامه مورد بازنگری قرار خواهند گرفت، اما برای اکثر موارد، سال‌ها بدون تغییر باقی‌مانده‌اند. منشأ این بارها باید در طول هر تحلیل قابلیت بهره‌برداری با استفاده از بارهای اسمی یا بخشی از بارگذاری‌های اسمی در نظر گرفته شود. تفسیر برای فصل ۴ از ۷ ASCE/SEI، بارهای زنده، بیان می‌کند که بارهای کف اندازه گیری شده در بررسی‌های بار زنده معمولاً بسیار کمتر از بارهای اسمی موجود در استاندارد و IBC هستند.

بارهای برف مشخص‌شده در فصل ۱۶ IBC با استفاده از فصل ۷ ۷ ASCE/SEI محاسبه می‌شوند. این بارها بر اساس میانگین بازگشت ۵۰ ساله (MRI) هستند. این بارها به‌عنوان بارهای اسمی در نظر گرفته می شوند. کمیته آیین‌نامه بارهای برف زمینی را با استفاده از تحلیل آماری سوابق آب‌وهوایی تعیین می‌کند.

بارهای باران مشخص‌شده در فصل ۱۶ IBC با استفاده از مقدار آب بارانی که در صورت گسیختگی سیستم زهکشی اصلی روی سقف باقی می‌ماند، تعیین می‌شود. این موضوع در ترکیبات بار بخش ۱۶۰۵ به‌عنوان بار اسمی در نظر گرفته می‌گردد.

ج. بارهای بهره‌برداری

بارهای بهره‌برداری در IBC تعریف یا استفاده نمی‌شوند. بارهای بهره‌برداری در ۷ ASCE/SEI در تفسیر پیوست c، "ملاحظات قابلیت بهره‌برداری"، با عنوان "بارهایی که در نقطه‌ای تصادفی از زمان‌بر سازه کنش می‌کنند" تعریف می‌شوند. این تفسیر با بیان اینکه بارهای مناسب برای استفاده در حالات حدی قابلیت بهره برداری فقط بخشی از بارهای اسمی باشند، ادامه می‌یابد. Ellingwood و Galambos (۱) پیشنهاد کردند که دوره بازگشت تعداد معینی از سال، به‌جای دوره‌هایی که در یک "نقطه تصادفی از زمان" کنش می‌کنند، برای ارزیابی سازه‌ها برای خیزهای کف غیرقابل‌قبول، ممکن است مناسب باشد. بر اساس این تحقیق، تفسیر برای پیوست c ۷ ASCE/SEI نشان می‌دهد که برای طراحی‌های قابلیت بهره‌برداری با استفاده از محدودیت

های تغییر شکل فعلی در اکثر استانداردهای منتشر شده، ترکیبات بار قابلیت بهره‌برداری شامل بارگذاری گذرا موارد زیر را می‌تواند شامل شود:

- کف / سقف – بار مرده اسمی + بار زنده اسمی
- سقف – بار مرده اسمی + ۰٫۵ بار برف اسمی

برای حالات حدی قابلیت بهره‌برداری که شامل بارگذاری طولانی مدت[۸]، خزش، نشست یا سایر اثرات است، ترکیب بار پیشنهادی به شرح زیر است:

- بار مرده اسمی + ۰٫۵ بار زنده اسمی

فشار باد در سطح بهره‌برداری به دو روش تعریف می‌شود. برای ارزیابی اجزا و نماسازی سازه‌ها، جدول ۱۶۰۴٫۳ IBC اجازه می‌دهد تا بار باد ۰٫۴۲ برابر بار اجزا و نماسازی در نظر گرفته شود، زمانی که خیزهایی که باید با محدودیت‌های جدول ارزیابی شوند، تعیین می‌گردند. ضریب ۰٫۴۲ ترکیبی از دو ضریب می‌باشد. ضریب اول ضریب ۰٫۶ است که برای تبدیل بار نهایی به بار اسمی استفاده می‌گردد. این ضریب از حالت بار طراحی تنش مجاز ارائه‌شده توسط معادله ۱۶-۱۲ IBC می‌تواند گرفته شود. ضریب دوم ضریب ۰٫۷ است که برای تبدیل بار اسمی به بار سطح بهره‌برداری استفاده می‌شود. بار باد سطح بهره‌برداری بر اساس دوره‌ی بازگشت ۱۰ ساله (MRI)، به‌جای دوره بازگشت ۵۰ساله که برای تعیین بار اسمی استفاده می‌گردد است. ضریب ۰٫۷ تقریباً برابر با مربع نسبت فرض‌شده سرعت باد دوره بازگشت ۱۰ ساله و سرعت باد دوره بازگشت ۵۰ساله است. مربع نسبت، به طور مؤثر تغییر سرعت باد را به تغییر فشار باد تبدیل می‌کند.

روش دوم در تفسیر ۷ ASCE/SEI برای پیوست c آمده است که نقشه‌های سرعت باد را برای محاسبه بارهای قابلیت بهره‌برداری برای دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله ارائه می‌دهد. این تغییر در رویکرد هنگام اعمال توصیه‌های محدودیت تغییر مکان نسبی جانبی از منابع قدیمی‌تر باید در نظر گرفته شود. توصیه‌های محدودیت تغییر مکان نسبی جانبی از چندین منبع (۲، ۳) به فشارهای باد با استفاده از دوره بازگشت ۱۰ساله اشاره می‌کنند. بااین‌حال، نقشه‌های سرعت باد از زمان‌نگارش این توصیه‌ها به طور قابل‌توجهی تغییر کرده‌اند.

د. بارهای الزامی IBC

بارهای موردنیاز IBC برای استفاده در تحلیل قابلیت بهره‌برداری به محدودیت ارزیابی اعمال‌شده بستگی دارد. الزامات قابلیت بهره‌برداری در بخش ۱۶۰۴٫۳ آمده است. به‌طورکلی، سه ارزیابی در این بخش گنجانده شد. مورد اول و دوم در بخش ۱۶۰۴٫۳٫۱ آمده که بیان می‌کند خیز اعضای سازه‌ای به مقادیر محدودتر ارائه‌شده در جدول ۱۶۰۴٫۳ و چندین استاندارد مصالح مرجع محدود شود. مورد سوم در بخش ۱۶۰۴٫۳٫۶ آمده که شامل محدودیت خیزی است که توسط استانداردی مرجع برای المان غیرسازه‌ای یا مصالح نازک‌کاری[۹] تحت‌تأثیر می‌تواند موردنیاز باشد.

جدول ۱۶۰۴٫۳ محدودیت‌های خیزی را ارائه می‌دهد که باید در برابر خیزهای سازه‌ای پیش‌بینی‌شده ناشی از بارهای زنده، باد، برف و مرده اسمی ارزیابی شوند.

استانداردهای مرجع در بخش‌های ۱۶۰۴٫۳٫۲ تا ۱۰۶۴٫۳٫۵ شامل محدودیت‌های خیز و انواع بارگذاری مختلف است. به نظر می‌رسد بارگذاری‌های بهره‌برداری ۳۱۸ ACI به بارهای اسمی مشخص‌شده توسط IBC و ۷ ASCE/SEI اشاره می‌کند.

استاندارد ACI ۳۱۸ شامل بررسی‌های خیز است که اثرات بارهای ماندگار را در نظر می‌گیرد. به نظر می‌رسد که مهندس در تعریف اینکه چه بخشی از بار زنده اسمی باید به‌عنوان بار پایدار اعمال شود، آزادی عمل دارد. مشخصات ANSI/AISC ۳۶۰ به بارهای بهره‌برداری اشاره می‌کند که در ASCE/SEI ۷ تعریف‌شده اند. مشخصات مؤسسه تیرچه فولادی[۱۰] آمریکا (SJI) شامل محدودیت‌های خیزی است که برای استفاده بارهای زنده اسمی مشخص شده است.

مشخصات بنایی ۱۱-۵ ۵۳۰-۱۱/ASCE/ACI ۴۰۲-۱۱ TMS به بارهای باد در سطح بهره‌برداری و همچنین بارهای مرده و زنده "غیر ضریب دار" یا اسمی برای استفاده در ارزیابی‌های قابلیت بهره‌برداری اشاره می‌کند. مشخصات بنایی همچنین شامل محدودیت‌های خیز بر اساس "خیز کل" برای پشتیبانی از دیوارهای شیشه‌ای بنایی است.

بخش IBC ۱۶۰۴,۳,۶ شامل محدودیت‌های خیزی است که در استانداردی مرجع برای المان‌های غیرسازه‌ای یا مصالح نازک‌کاری گنجانده شده است. شرایط بارگذاری موردنیاز برای این بررسی‌های خیز از استاندارد به استاندارد دیگر متفاوت خواهد بود و ممکن است با بارگذاری‌های مشخص‌شده در ASCE/SEI ۷ یا IBC مطابقت داشته باشد یا نداشته باشد. مهندس طراح باید این استانداردهای غیرسازه‌ای را برای تعیین بارگذاری های موردنیاز که با محدودیت‌های خیز مطابقت دارند، تحقیق کند.

در نهایت، هنگام درنظرگرفتن انتخاب بارهایی که در طراحی قابلیت بهره‌برداری یا ارزیابی ساختمان استفاده می‌شود، مهندس باید معیار نهایی عملکرد را که در آیین‌نامه گنجانده شده است، در نظر بگیرد. هنگامی‌که سختی یا عملکرد ساختمان موجود زیر سؤال می‌رود، بخش IBC ۱۷۰۹ استفاده از آزمایش بارگذاری در محل را تجویز می‌کند. این آزمایش بیان می‌کند که "تحت بار طراحی، خیز نباید از محدودیت‌های مشخص‌شده در بخش ۱۶۰۴,۳ تجاوز کند. "

بنابراین، عملکرد خیز سازه در نهایت تحت "بار طراحی" ارزیابی خواهد شد. بااین‌حال، اصطلاح "بار طراحی" در IBC تعریف نشده است؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که مهندس بارهای طراحی را برای طراحی قابلیت بهره برداری می‌تواند مشخص کند که به بهترین نحو با ویژگی‌ها و پیامدهای معیارهای خیز مطابقت داشته باشد؛ بنابراین، اگر محدودیت‌های جدول IBC ۱۶۰۴,۳ طراحی خیز را کنترل کند، بار اسمی مشخص‌شده توسط IBCبار طراحی خواهد بود. از طرف دیگر، اگر محدودیت خیز دیگری بر طراحی حاکم باشد، مهندس بر اساس استاندارد یا مشخصات مصالح بار طراحی جداگانه‌ای ممکن است تعریف کند. کلید این است که احتمال وقوع بار انتخاب‌شده تاحدامکان با احتمال وقوع موردنظر حالت حدی قابلیت بهره‌برداری که مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت، مطابقت داشته باشد.

ه. تاریخچه بارگذاری

سابقه بارگذاری مفهومی مهم است که باید در هر طراحی یا تحلیل قابلیت بهره‌برداری گنجانده شود. ازآنجایی‌که گسیختگی با آسیب یا ازدست‌رفتن استفاده از برخی از اجزای الحاقی یا المانی از ساختمان تعریف می‌شود، خیزی که در حال تحلیل است، باید خیزی باشد که توسط آن المان یا مؤلفه تکمیلی تجربه می‌گردد. خیزی که توسط المان یا مؤلفه تکمیلی تجربه می‌شود، تفاوت بین خیز در پایان نصب المان و حداکثر خیز تجربه شده در زمانی که المان در جای خود قرار دارد است.

پیش خیز[۱۱] المان‌های سازه‌ای با مهار یا بدون مهار، در صورت وجود، باید در ارزیابی قابلیت بهره‌برداری در گرفته شود. پیش خیز المان‌های سازه‌ای به‌طورکلی برای کاهش اثرات مضر خیزهای[۱۲] مورداستفاده قرار گرفت. المان به‌سمت بالا خمیده می‌شود به‌طوری که وقتی تحت بار مشخصی (معمولاً وزن خود عضو) خم می‌گردد، المان به سطح نزدیک‌تر از زمانی است که پیش خیز نباشد. بنابراین، خیز "مؤثر" برابر با خیز واقعی من‌های پیش خیز خواهد بود. بنابراین، اگر المانی سازه‌ای دارای پیش‌خیزی معادل ۷۵ درصد خیز وزن خود محاسبه‌شده باشد، در آن صورت تنها ۲۵ درصد از خیز وزن خود هنگام ارزیابی المان در برابر محدودیت‌های خیز بار مرده در نظر گرفته می‌شود.

در عمل، ممکن است مهندس سازه از زمانبندی نصب نازک کاری[۱۳] ساختمان مطلع نباشد. بااین‌حال، زمان نهایی یا المان‌های غیرسازه‌ای در ساختمان، تأثیر قابل توجهی بر قابلیت پذیرش طرح‌هایی داشته باشد که از سیستم‌هایی با خزش و انقباض استفاده می‌کنند. برای مثال، در سازه‌های بتنی پیش‌تنیده نشده، خیزی که ناشی از بارگذاری پایدار است، به طور معمول در طول دورهٔ پنج‌ساله، دوبرابر خیز اولیه در نظر گرفته می‌شود. بااین‌حال، بخش زیادی از این خیز در ماه‌های اول پس از برداشتن قالب‌ها رخ می‌دهد؛ بنابراین، اگر نصب نهایی‌های داخلی حیاتی مانند کف‌پوش سنگی یا سقف‌های گچ‌بری تا سه ماه پس از برداشتن تکیه‌گاه‌ها به تعویق بیفتد، خیزی که ناشی از اثرات بارگذاری پایدار وزن خود سازه است ممکن است تا ۵۰ درصد کاهش یابد.

زمان اعمال بار نیز ضریب مهمی برای المان‌هایی می‌تواند باشد که بارهای طبقاتی را که بعد از نصب المان‌های معماری ساخته می‌شوند، منتقل می‌کنند. همین موضوع برای سازه‌هایی که برای پشتیبانی از گسترش‌های آینده عمودی یا افقی طراحی‌شده‌اند نیز مهم است.

I.۲ تحلیل قابلیت بهره‌برداری

پاسخ المان یا سیستم سازه‌ای به بارهای سطح بهره‌برداری به‌صورت الاستیک ممکن است فرض شود. این فرض با این واقعیت که اکثر تحلیل‌های خیز موردنیاز آیین‌نامه بر اساس حداکثر اسمی و نه بارهای بهره‌برداری هستند، پیچیده می‌شود. بااین‌حال، ازآنجایی‌که بارهای بهره‌برداری کمتر از بارهای اسمی در نظر گرفته می گردند، انجام تحلیل قابلیت بهره‌برداری با استفاده از بارهای اسمی و رفتار الاستیک مصالح، عموماً محافظه کارانه می‌باشد. این محافظه‌کاری ممکن است برای تحلیل‌هایی که تغییر شکل‌های ماندگار را در نظر می‌گیرند، بیش از حد شود. تغییر شکل‌های ماندگار ناشی از ترک‌خوردن المان، خزش مصالح تحت بار یا انقباض مصالح در طول زمان ممکن است باشد. فرض بر اینکه حداکثر بارهای اسمی برای مدت طولانی اعمال شوند، منجر به برآوردهای بیش از حد محافظه‌کارانهٔ خیز می‌تواند شود. هنگام محاسبه اثر بارهای ماندگار، طراح باید کاهش بارهای اسمی موردنیاز آیین‌نامه‌های ساختمانی را در نظر بگیرد.

تحلیل قابلیت بهره‌برداری همچنین باید با معیارهای قابل‌قبولی که در ارزیابی استفاده می‌شود، مطابقت داشته باشد. بسیاری از معیارهای قابلیت بهره‌برداری به‌عنوان محدودیتی برای خیز تحت شرایط بارگذاری خاصی ارائه می‌شوند. برخی دیگر حد خیزی را که پس از نصب نهایی یا المان‌هایی که ممکن است توسط آن خیز آسیب ببینند، ارائه می‌دهند. تحلیل قابلیت بهره‌برداری باید مشخصات مصالح، مشخصات عضو و اثرات زمان را در هر نقطه از بزرگی بار و تاریخچهٔ آن در نظر بگیرد.

استاندارد ACI ۳۱۸ شامل چندین الزام و راهنمایی مرتبط با تحلیل سازه‌های بتنی برای مسائل قابلیت بهره برداری مربوط به خیز است. برای خیز در اعضای خمشی، بخش‌های ۹,۵,۲,۳ تا ۹,۵,۲,۵ شامل الزاماتی است که با تأثیر سختی، خزش و انقباض بر تحلیل خیز سروکار دارد. بخش‌های ۹,۵,۴,۱ و ۹,۵,۴,۲ دستورالعمل‌هایی را برای تعیین تغییر شکل‌ها در المان‌های بتنی پیش‌تنیده ارائه می‌دهند.

بخش ۱۰,۱۰,۴ استاندارد ACI ۳۱۸ شامل الزاماتی برای تحلیل مرتبه دوم الاستیک مرتبط با تغییر مکان نسبی جانبی است. شرح این بخش بیان می‌کند که مقادیر سختی (EI) حاصل از این الزامات فقط برای طراحی بر اساس مقاومت در نظر گرفته‌شده‌اند و نشان‌دهندهٔ سختی اعضای سازه درست قبل از شکست هستند. در عمل، بسیاری از مهندسان از این الزامات در محاسبهٔ تغییر مکان جانبی در تحلیل قابلیت بهره‌برداری استفاده می‌کنند. استفاده از این خواص برای تحلیل‌های قابلیت بهره‌برداری منجر به نتایج بسیار محافظه‌کارانه‌ای خواهد شد. در تحلیل قابلیت بهره‌برداری، مشخصات اعضای سازه‌ای بتنی باید میزان ترک‌خوردگی مورد انتظار را در بارهای سطح بهره‌برداری در نظر بگیرند.

مگر اینکه برآورد دقیق‌تری از تأثیر ترک‌خوردگی بر سختی عضو انجام شود، استفاده از ممان‌های اینرسی اعضا ۱,۴۳ برابر با آنچه با استفاده از بخش ۱۰,۱۰,۴ استاندارد ACI ۳۱۸ به دست می‌آید، مجاز است. رویه‌های دقیق‌تر برای تعیین مشخصات مصالح و عضو برای تحلیل قابلیت بهره‌برداری تغییر مکان جانبی در شرح (تفسیر) بخش ۱۰ استاندارد ACI ۳۱۸ ذکر شده است.

در قاب‌های با کف عرشه فولادی و سقف با قاب بندی فولادی[۱۴]، بسیاری از اتصالات پیچشی برای طراحی اساس مقاومت به‌عنوان لولا (اتصال مفصلی) در نظر گرفته می‌شوند. این فرض برای سطوح بارگذاری ضریب دار یا نهایی مناسب است. بااین‌حال، در بارهای سطح بهره‌برداری، اتصالات پیچشی در قاب‌های بال‌پهن[۱۵]، محدودیت چرخشی قابل‌توجهی می‌توانند فراهم کنند. این محدودیت چرخشی ممکن است خیز واقعی را تا ۸۰ درصد کمتر از آنچه با فرض تیر مفصلی پیش‌بینی می‌شود، کاهش دهد (۱). تحلیل‌های قابلیت بهره‌برداری قاب های کف کامپوزیت (دال بتنی روی تیرهای فولادی) باید سختی‌های الاستیک مؤثر را که در بارهای سطح بهره‌برداری محاسبه‌شده‌اند، در نظر بگیرند. همچنین خیزهای بلندمدت ناشی از خزش و انقباض بال فشاری بتنی باید در نظر گرفته شود.

اکثریت‌قریب‌به‌اتفاق محدودیت‌های خیز قابلیت بهره‌برداری منتشر شده، برای اعمال به تغییر شکل‌هایی در نظر گرفته‌شده‌اند که با استفاده از تحلیل‌های مرتبه اول الاستیک با مشخصات اعضا محاسبه‌شده در بارهای سطح بهره‌برداری به‌دست‌آمده‌اند. طراح باید از تأثیرگذاری لحاظ‌کردن اثرات مرتبه دوم و کاهش سختی اعضا که در رویه‌های تحلیل گنجانده شده‌اند، آگاه بوده و آن‌ها را در نظر بگیرد. برای مثال، فصل C استاندارد ANSI/AISC ۳۶۰نیازمند تحلیل مرتبه دوم برای طراحی بر اساس مقاومت است. روش تحلیل مستقیم شامل کاهش سختی اعضای سازه‌ای برای درنظرگرفتن اثرات لاغری در بارهای نهایی است. همچنین استاندارد ACI ۳۱۸نیز در بخش‌های ۱۰,۱۰,۵ تا ۱۰,۱۰,۷ بزرگ‌نمایی ممان را در نظر می‌گیرد.

I.۳ معیارهای قابلیت بهره‌برداری

شرح (تفسیر) پیوست C استاندارد ASCE/SEI ۷ بیان می‌کند که "... معیارهای قابلیت بهره‌برداری برای اطمینان از عملکرد کاربردی و به‌صرفه‌بودن طراحی ضروری هستند... ". علاوه بر این، معیارهای قابلیت بهره

برداری برای حفظ محتویات ارزشمند داخل ساختمان‌ها، ضروری هستند. آسیب و زوال وارده نازک کاری [۱۶]و المان‌های غیرسازه‌ای در طول عمر ساختمان، ارزش و کاربری آن را برای مالک و همچنین عموم مردم کاهش می‌دهد.

تا تاریخ انتشار این متن، جامعه مهندسی سازه، استانداردی مورد بررسی، توافق‌شده و مبتنی بر تحقیق برای معیارهای قابلیت بهره‌برداری ندارد؛ بنابراین، از مهندس طراح انتظار می‌رود که معیارهای قابل‌اجرایی را به‌تنهایی تعیین کند. این امر مستلزم درک خوبی از خاستگاه، محدودیت‌ها و فرضیات گنجانده شده در معیارهای قابلیت بهره‌برداری ارائه‌شده در IBC و همچنین سایر نشریات و استانداردهای مرجع است.

برای تعیین محدودیت‌ها و معیارهای قابلیت بهره‌برداری، مهم است که عملکرد یا رفتاری که قابلیت بهره‌برداری ساختمان را کاهش می‌دهد، به طور واضح تعریف شود. عملکرد قابلیت بهره‌برداری سازه‌ای را عموماً در سه دسته می‌توان طبقه‌بندی کرد:

- تغییر شکل‌های استاتیکی
- تغییر شکل‌های دینامیکی (ارتعاشات)
- زوال

در ادامه، تغییر شکل‌های استاتیکی و دینامیکی با جزئیات بیشتر مورد بحث قرار خواهند گرفت. زوال تسهیلات که ناشی از رفتار یا عملکرد غیرقابل‌قبول سازه است، خارج از محدوده این سند است.

۱ .تغییر شکل استاتیکی

تغییر شکل استاتیکی المان یا سیستم سازه‌ای به طور معمول با عنوان "خیز" شناخته می‌شود. ایجاد خیز یا تغییر شکل‌های استاتیکی بیش از حد، منجر به مشکلات مختلفی در قابلیت بهره‌برداری سازه می‌تواند شود (۱).

الف. آسیب به اجزای غیرسازه‌ای مانند آسیب به نازک کاری معماری [۱۷](مانند سنگ، موزائیک، گچکاری، سفیدکاری، سیمان کاری و غیره) و المان‌های معماری (مانند پارتیشن (دیوار غیر سازه ای) داخلی و خارجی، زیرسازی سقف)[۱۸]

ب. آسیب رسیدن به عملکرد اثاثیه متاثر از ارتعاش و خراب شدن مبلمان (صندلی، میز ناهارخوری یا میزتحریر، ناترازی و بهم خوردن کالیبراسیون تجهیزات کارگاهی حساس به ارتعاش ، اعوجاج چهارچوب و گیرکردن درب ها در هنگام باز و بسته شدن، عدم ثبات قفسه‌های بایگانی) و تاسیسات (لوله‌کشی، قفسه های متراکم بایگانی متحرک دو طرفه، آسانسور، تیغه‌های جداکننده قابل‌حرکت، پوشش پشت‌بام)[۱۹]

ج. ازدست‌دادن کارایی در بهره‌برداری در اختلال عملکرد پرسنل (به‌عنوان‌مثال، پریشانی ناشی از نشست ناترازی کف طبقات، نگرانی در مورد علائم گسیختگی در پوشش‌ها) و نیاز به تعمیرات و نگهداری مورد نیاز برای تعمیر یا تعویض پوشش‌ها و المان‌های آسیب‌دیده یا نامناسب.[۲۰]

د. زوال سازه ساختمان و المان‌ها و پوشش‌های غیرسازه‌ای به دلیل نفوذ آب، مصالح یخزدا یا سایر مصالح از طریق ترک‌ها یا اتصالات دچار اعوجاج شده.

بحث دقیق‌تر در مورد مسائل مربوط به قابلیت بهره‌برداری ناشی از تغییر شکل‌های استاتیکی یا خیز را در مراجع ۳، ۴، ۵ و ۶ می‌توان یافت.

محدودیت‌های قابلیت بهره‌برداری برای تغییر شکل‌های استاتیکی به چندین متغیر بستگی دارد، از جمله:

- مشکل قابلیت بهره‌برداری که از آن جلوگیری می‌شود.
- توانایی مصالح یا قطعات غیرسازه‌ای، از جمله اتصالات برای تحمل تغییر شکل بدون آسیب.
- هندسه مشخصه مورد کاربرد [۲۱](به‌عنوان‌مثال، جهت‌گیری پارتیشن‌ها نسبت به انحنای کف یا سقف شکل یافته)
- بزرگی و فرکانس فرض شدهٔ شرایط بارگذاری

ضریب کلیدی در عملکرد، بر همکنش بین مصالح یا پوشش غیرسازه‌ای خاص و سیستم سازه‌ای خاصی است که به آن متصل یا توسط آن پشتیبانی می‌شود. برای مثال، سیستم کف موزائیک شناور ممکن است بتواند تغییر شکل‌های کف بزرگ‌تری را نسبت به سیستم کف چسبیده تحمل کند.

برای بیش از یک قرن، آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی، محدودیت‌های قابلیت بهره‌برداری برای تغییر شکل‌های استاتیکی را به‌صورت حداکثر نسبت مجاز دهانه به خیز ارائه کرده‌اند (۴). مبنای این نسبت‌ها را به طور تقریبی به مقادیر قابل‌قبول انحنای کف یا دیوار می‌توان ردیابی کرد که از لحاظ تاریخی منجر به عملکرد قابل‌قبول قابلیت بهره‌برداری شده‌اند.

هرکسی که از معیار نسبت دهانه به خیز استفاده می‌کند، باید محدودیت‌های این مقادیر را در نظر بگیرد و بداند که آن‌ها مقادیر دقیقی نیستند. دقت و پیچیدگی تحلیل مورداستفاده باید متناسب با شرایط باشد.

جدول IBC ۱۶,۰۴,۳ (جدول I.۱) نمونه‌ای از مجموعه‌ای معیارهای قابلیت بهره‌برداری بر اساس حداکثر نسبت مجاز دهانه به خیز است. از آنجایی‌که این الزامات، الزامات آیین‌نامه‌ای هستند، باید در هر طراحی که تحت حاکمیت این آیین‌نامه قرار دارد، رعایت شوند؛ بااین‌حال، این محدودیت‌ها باید حداقل الزام در نظر گرفته شوند. اعمال برخی از الزامات این جدول با اطمینان بالا ممکن است دشوار باشد. برای مثال، عبارت ℓ توسط IBCتعریف نشده است. می توان فرض نمود که دهانه مورد ارزیابی بر اساس بخش i جدول ۱۶,۰۴,۳ بدین صورت که:[۲۲] "برای اعضای طره، باید به‌عنوان دوبرابر طول طره در نظر گرفته شود". به نظر می‌رسد که های داخلی باید به‌گونه‌ای طراحی گردند که قابلیت بهره‌برداری خود را در برابر بادهایی که از خارج ساختمان اعمال می‌شوند، حفظ کنند. بااین‌حال، این موضوع عملی نیست. در نهایت، بخش g نشان می‌دهد که هنگام محاسبه خیز برای حالت بارگذاری $D + L$ برای اعضای سازه‌ای فولادی، "بار مرده باید صفر در نظر گرفته شود".

این بخش باید بااحتیاط اعمال گردد و هرگونه اثر منفی که خیز ناشی از بار مرده بر قابلیت بهره‌برداری سازه ممکن است داشته باشد، در نظر گرفته شود.

جداول I.۲ تا I.۴ حاوی اطلاعات اضافی درارتباط‌با محدودیت‌های نسبت خیز به دهانه و عملکرد قابلیت بهره برداری همراه آن از منابع ۳، ۶ و ۱ هستند.

اگرچه به نظر می‌رسد اعمال محدودیت‌های قابلیت بهره‌برداری بر اساس نسبت خیز به دهانه ساده باشد، طراحان باید کمبودهای ذاتی این روش را در پیش‌بینی عملکرد قابلیت بهره‌برداری سیستم سازه‌ای سه‌بعدی در نظر بگیرند.

پاسخ کلی مصالح غیرسازه‌ای، پوشش‌ها و اجزا به تغییر شکل سازه‌ای شامل هر دو مؤلفه خمشی و برشی است. مؤلفه برشی پاسخ منجر به کج‌شدن یا پارگی پوشش یا المان غیرسازه‌ای می‌شود. مؤلفه خمشی پاسخ منجر به

خم شدن و ترک‌خوردن پوشش یا المان می‌گردد. شکل I.۱ نمونه‌هایی از رفتار خمشی و برشی برخی از المان های غیرسازه‌ای تغییر شکل یافته را نشان می‌دهد.

محدودیت‌های نسبت خیز به دهانه، معیارهای دوبعدی را برای مسئله سه‌بعدی اعمال می‌کنند؛ بنابراین، کاربرد آن‌ها محدود است. سیستم‌های کف شامل المان‌های متقابل متعدد یا تک‌صفحه‌ای هستند که به‌صورت سطحی تغییر شکل می‌دهند. المان‌های غیرسازه‌ای به طور تصادفی روی سطح کف یا سقف نصب می‌شوند. راستا، دامنه و موقعیت المان یا کفسازی روی سطوح کف یا سقف خیزیافته، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد قابلیت بهره‌برداری سیستم خواهد داشت. [۲۳] شکل I.۲، پلان یک‌طبقه اداری با دو پارتیشن را نشان می‌دهد. خیز کف به‌صورت هم تراز [۲۴] ارائه‌شده است. پارتیشن A نزدیک شاه‌تیر قرار گرفته و موازی با بُعد کوتاه دهانه سازه‌ای جهت شده است. پارتیشن B موازی با بُعد بلند دهانه سازه‌ای و نزدیک مرکز دهانه قرار گرفته است. در این پیکربندی، پارتیشن A خیز تفاضلی [۲۵] ۳/۸ اینچ و پارتیشن B خیز تفاضلی ۳/۴ اینچ را تجربه می‌کند. عملکرد پارتیشن احتمالاً قابل‌قبول خواهد بود، درحالی‌که عملکرد پارتیشن B ممکن است قابل‌قبول نباشد.

شکل I.۳ تأثیر محل قرارگیری و اندازه المان بر عملکرد واقعی قابلیت بهره‌برداری را نشان می‌دهد. در اینجا پارتیشن A کوتاه‌تر و در وسط دهانه قرار دارد، درحالی‌که پارتیشن B بلندتر و نزدیک به ستون است. پارتیشن A تحت تغییر مکان تفاضلی [۲۶] [۲۷] حدود ۱/۴ اینچ و پارتیشن B تحت تغییر مکان تفاضلی ۷/۸ اینچ قرار گرفت. همان‌طور که قبلاً گفته شد، درحالی‌که عملکرد پارتیشن A احتمالاً قابل‌قبول خواهد بود، عملکرد پارتیشن B ممکن است قابل‌قبول نباشد.

ازآنجایی‌که مهندس طراح از چیدمان و نحوه قرارگیری پارتیشن‌ها نمی‌تواند مطلع باشد، تحلیلی که چنین اطلاعاتی را در طراحی لحاظ کند، به‌جز در موارد بسیار خاص، خارج از محدوده استاندارد خدمات است. بااین‌حال، این بحث نشان‌دهندهٔ دشواری و بیهودگی در اعمال دقیق معیارهای خیز بر اساس نسبت خیز به دهانه است؛ بنابراین، هنگام اعمال محدودیت‌های نسبت خیز به دهانه، طراح باید از اختیار عمل، تجربه و قضاوت مهندسی در تعریف دهانه استفاده کند. برای اعمال صحیح محدودیت‌ها و جلوگیری از عملکرد غیرقابل‌قبول در بهره برداری، دهانه‌های مورداستفاده در آن تحلیل باید رفتار سه‌بعدی سیستم‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای را در نظر بگیرند.

دهانه محدودکننده‌ای که برای تعیین خیز محدودکننده استفاده می‌شود، همیشه دهانهٔ المان قاب‌بندی منفرد نخواهد بود. طراح باید هنگام تعیین خیز محدودکننده، هم انحنای سطح و هم جهت‌گیری المان‌ها روی سیستم کف را در نظر بگیرد؛ بنابراین، نسبت تعریف‌شده بر اساس اختلاف خیز بین دونقطه روی کف یا دیوار تقسیم‌بر فاصله بین آن نقاط است. ازآنجایی‌که معیارهای نسبت خیز به دهانه بر اساس مدل دهانه ساده است، نسبت تعریف‌شده به اختلاف خیز تقسیم‌بر دوبرابر فاصله بین نقاط موردنظر تبدیل می‌شود. احتمال گسیختگی‌های ناشی از مشکلات قابلیت بهره‌برداری زمانی بیشتر می‌گردد که این نسبت به نسبت‌های محدودکننده‌ای که در IBC و سایر منابع ارائه‌شده نزدیک گردد یا از آن‌ها تجاوز کند.

در ادامه چند نمونه برای نشان‌دادن پیچیدگی‌های اعمال محدودیت‌های نسبت خیز به دهانه بر اساس المان ساده آورده شده است:[۲۸]

۱. سیستم کف یا سقف با نسبت ابعادی (نسبت ابعاد دهانه سازه‌ای) [۲۹] بزرگ‌تر از ۱٫۵ روی تیرها یا دیوارهای سخت (شکل I.۴)

۲. سیستم‌های دیوار با نسبت ابعادی (نسبت ارتفاع دیوار به عرض دیوار) بزرگ‌تر از ۱٫۵ بین ستون‌های خارجی یا دیوارهای متقاطع [۳۰] (شکل I.۵)

۳. سیستم کف با ستون یا تکیه‌گاه منفرد (شکل I.۶)

۴. سیستم‌های قاب بندی غیرمستقیم الخط یا پیچیده [۳۱] (شکل I.۷)

۵. تیر طره روی تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر (شکل I.۸)

در بسیاری از موارد، مهندس از چیدمان المان‌های غیرسازه‌ای اطلاع نخواهد داشت و باید در تحلیل‌های مربوط به قابلیت بهره‌برداری، فرضیه‌ای محتاطانه اما منطقی اتخاذ گردد.

محدودیت دیگر برای استفاده از نسبت‌های خیز به دهانه برای پیش‌بینی عملکرد قابلیت بهره‌برداری، نبودِ یک حد بالایی است که برای دهانه‌های بلند قابل‌اعمال باشد. متخصصان مدرن باید در نظر بگیرند که در زمان توسعه این محدودیت‌ها، دهانه‌های کف بیش از ۲۰ فوت و دهانه‌های سقف بیش از ۴۰ فوت نادر بودند؛ بنابراین، اعمال این نسبت‌های خیز به سازه‌های مدرن با دهانه تیرهای محیطی ۳۰ فوت یا بیشتر، دهانه‌های داخلی به بزرگی ۳۰ در ۴۵ فوت، ارتفاع نمای چندطبقه و دهانه‌های سقف ۶۰ فوت یا بیشتر باید بااحتیاط انجام شود. در چنین مواردی، استفاده از محدودیت‌های حداکثر خیز گسسته [۳۲] باید مورد بررسی قرار گیرد.

۲. تغییر شکل‌های دینامیکی

تغییر شکل‌های دینامیکی یا ارتعاش المان‌ها و سیستم‌های سازه‌ای اغلب با ناراحتی ساکنین و گاهی اوقات به عملکرد تجهیزات مستعد به حرکت در ارتباط هستند. راحتی ساکنین تحت‌تأثیر ارتعاش کف ناشی از بارهای دینامیکی ثقلی و شتاب‌های سازه‌ای ناشی از حرکت ساختمان در هنگام اعمال نیروهای باد قرار خواهد گرفت. در IBC الزاماتی که مستقیماً به عملکرد قابلیت بهره‌برداری دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای مرتبط باشد، وجود ندارد. همچنین الزاماتی درارابطه‌با آسایش کلی ساکنین ساختمان یا عملکرد قابل‌قبول تجهیزات پشتیبانی وجود ندارد. همین مورد در مورد استاندارد ACI ۳۱۸ نیز صادق است.

بخش C.۱,۳ در استاندارد ASCE/SEI ۷ نشان می‌دهد که طراحی برای قابلیت بهره‌برداری باید شامل توجه به ارتعاش کف برای شرایط زیر باشد:

- سیستم‌های کف با بازشوهای بزرگ بدون پارتیشن و سایر منابع میرایی [۳۳]
- سازه‌هایی که در آن‌ها ارتعاش ناشی از تردد عابران پیاده ممکن است آزاردهنده باشد

علاوه بر این، بخش C.۱,۳ نیاز به اقداماتی برای مجزا کردن ورودی ارتعاش ناشی از تجهیزات مکانیکی که باعث ایجاد ارتعاش‌های آزاردهنده در مناطق قابل سکونت شوند، دارد. همچنین طراحی برای جلوگیری از ارتعاش‌های ناشی از باد که باعث ناراحتی ساکنین شود، ضروری است. استاندارد ANSI/AISC ۳۶۰ نیاز دارد که ارتعاش‌های ناخوشایند و حرکات ناشی از باد در طراحی در نظر گرفته شوند.

معیارهای قابلیت بهره‌برداری که برای محدودکردن ارتعاش‌های ناخوشایند کف استفاده می‌شوند، اشکال مختلفی به خود می‌گیرند. روش‌های اولیه شامل نسبت‌های خیز استاتیکی به دهانه و نسبت عمق عضو سازه‌ای به دهانه است. در سازه‌های مدرن، کنترل‌های سنتی تغییر شکل استاتیکی برای جلوگیری از ارتعاش‌های غیرقابل‌قبول

و آزاردهنده در سازه کافی نیست. کنترل سختی ارائه‌شده توسط این روش‌های اولیه، جنبه مهمی از رفتار دینامیکی است؛ بااین‌حال، توزیع جرم، میرایی ارتعاش و فرکانس‌های نسبی بین فعالیت و سیستم سازه‌ای به همان اندازه یا حتی بیشتر اهمیت دارد.

اکنون روش‌های دقیق‌تری که این اثرات را در نظر می‌گیرند به‌راحتی در دسترس طراحان قرار گرفته است (منابع ۲، ۵، ۷، ۸، ۱۵). بحث خوبی در مورد عملکرد ارتعاشی سازه‌ها در بخش CC۱,۳ استاندارد ASCE/SEI ۷ ارائه‌شده است. برای این روش‌های دقیق‌تر، معیارهای محدودکننده به مقادیر ذهنی مرتبط با اشغال و استفاده از ناحیه‌ای که مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت، بستگی دارد.

I.٤ طراحی قابلیت بهره‌برداری برای سیستم‌های سازه‌ای

نحوهٔ رسیدگی به مسائل مرتبط با قابلیت بهره‌برداری در بین سیستم‌های سازه‌ای متفاوت است. توجه به اثرات زمان، سابقه بارگذاری، انقباض مصالح، پایداری، شرایط انتهایی و غیره بسته به تأثیر نسبی این اثرات بر عملکرد قابلیت بهره‌برداری سیستم، متفاوت است. نحوهٔ رسیدگی به این اثرات همچنین تحت‌تأثیر توانایی جامعه مهندسی در پیش‌بینی دقیق تأثیر این اثرات قرار دارد.

۱. سیستم‌های بتنی

رایج‌ترین سیستم‌های بتنی، سیستم‌های مسلح معمولی و سیستم‌های پیش‌تنیده یا پس‌تنیده هستند. مسائل مربوط به قابلیت بهره‌برداری برای بتن بدون آرماتور نادر است و در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرد. طراحی قابلیت بهره‌برداری برای سیستم‌های بتنی پیش‌ساخته باید شامل اثرات بارهای حمل‌ونقل و نصب و همچنین رواداری‌های ساختمانی باشد. این اثرات به جزئیات هر کارخانهٔ ساخت و هر پروژه بستگی دارد؛ از این رو، در اینجا مورد بحث قرار نخواهند گرفت.

اثرات کلیدی که باید در قابلیت بهره‌برداری سیستم‌های بتنی در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از ترک‌خوردگی، مهار، خزش و انقباض.

الف. اثرات زمان – ازآنجایی‌که خزش و انقباض تأثیر قابل‌توجهی بر مقدار خیزی که در المان‌های و سازه های بتنی رخ می‌دهد، می‌توانند داشته باشند، هر دو باید در هر طراحی قابلیت بهره‌برداری لحاظ شوند. استاندارد ACI ۳۱۸ نیازمند آن است که خیز بلندمدت ناشی از اثرات زمان با استفاده از ضوابط بخش ۹,۵,۲,۵ استاندارد ACI تعیین گردد، مگر اینکه تحلیل جامع‌تری انجام شود. مطابق با بخش ۹,۵,۲,۵، خیز بلندمدت با ضرب‌کردن خیز آنی ناشی از بارهای ماندگار ۳۴ در ضریب خیز بلندمدت λ تعیین شود.

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1+50\rho'}$$

ضریب وابسته به زمان برای بارهای ماندگار (ξ)، توسط ۳۱۸-۱۰ ACI شکل R۹,۵,۳,۵ ارائه‌شده است (شکل I.۹ را مشاهده فرمایید). ρ' در وسط دهانه برای دهانه‌های ساده و دهانه‌های پیوسته و در تکیه‌گاه‌ها، زمانی که برای طره‌ها استفاده می‌شود تعیین می‌گردد.

ب. المان‌های مسلح معمولی – بخش ۱۶۰۴,۳,۲ از IBC مشخص می‌کند که خیز اعضای سازه‌ای بتن آرمه نباید از مقادیر مجاز بر اساس استاندارد ۳۱۸ ACI تجاوز کند. بخش ۹,۵ استاندارد ۳۱۸ ACI ضوابطی را برای کنترل خیز اعضایی که تحت خمش قرار خواهند گرفت، ارائه می‌دهد.

بخش ۹,۵,۱ استاندارد ACI ۳۱۸ نیازمند آن است که اعضای بتن مسلح دارای "سختی کافی برای محدودکردن خیزها یا هرگونه تغییر شکلی باشند که به طور نامطلوبی بر مقاومت یا قابلیت بهره‌برداری سازه تأثیر می‌گذارد. "

تفسیر بخش ۹,۵,۱ استاندارد ACI ۳۱۸ نشان می‌دهد که دو روش برای طراحی المان به‌منظور کنترل خیز ناشی از خمش وجود دارد:

روش اول این است که عضو یا المانی با ضخامت بیشتر از حداقل مشخص‌شده فراهم گردد. این روش در صورتی قابل‌اجرا است که عضو خمشی، از المان‌ها یا پوشش‌هایی که احتمالاً با خیزهای زیاد آسیب ببینند، پشتیبانی نکند. اگر حداقل ضخامت موردنیاز برآورده نشود یا اگر عضو از المان‌هایی پشتیبانی کند که احتمالاً با خیزهای زیاد آسیب ببینند، باید خیزها محاسبه گردند. متأسفانه، استاندارد ACI تعریفی برای "خیز زیاد" ارائه نمی‌دهد. این به عهدهٔ طراح است که این اصطلاح را تعریف کند. مروری موشکافانه بر ضوابط قابلیت بهره برداری ACI ۳۱۸ مفید باشد. جدول ۹,۵(b) شامل دو محدودیت خیز برای کف‌ها و دو محدودیت برای سقف هایی است که از المان‌های غیرسازه‌ای که احتمالاً با خیز زیاد آسیب می‌بینند، نگه نمی دارد نمی‌کنند یا به اجزاء غیر سازه ای متصل نمی گردند. این موارد به‌صورت زیر هستند:[۳۵]

$$\Delta_{APP} < \frac{\text{دهانه}}{۲۴۰} \quad \text{و} \quad \Delta_{LL} < \frac{\text{دهانه}}{۱۸۰} \quad \text{برای بام‌ها}$$

$$\Delta_{APP} < \frac{\text{دهانه}}{۲۴۰} \quad \text{و} \quad \Delta_{LL} < \frac{\text{دهانه}}{۳۶۰} \quad \text{برای کف‌ها}$$

باتوجه‌به این موارد، استنباط می‌توان کرد که این اعداد تعریفی برای خیز زیاد هستند؛ بنابراین، طراح ممکن است محاسبهٔ خیز را برای اعضای سازه‌ای که از المان‌های غیرسازه‌ای که با خیزهای بزرگ‌تر از این مقدار آسیب ببینند، پشتیبانی می‌کنند یا به آن‌ها متصل هستند، در نظر بگیرد.

حداقل الزامات ضخامت برای سیستم‌های یک‌طرفه [۳۶]با آرماتور معمولی در بخش ۹,۵,۲ استاندارد ACI آمده است. حداقل الزامات ضخامت دال برای سیستم‌های دوطرفه در بخش ۹,۵,۳ ارائه‌شده است. لازم به ذکر است که در هر زمانی از المان‌های با ضخامت (عمق) کمتر می‌توان استفاده کرد، مشروط بر اینکه محاسبهٔ خیز نشان دهد که بدون اثرات مخرب از ضخامت کمتر می‌توان استفاده کرد. همچنین باید توجه داشت که اتکا بر حداقل الزامات ضخامت برای طراحی قابلیت بهره‌برداری، تضمینی برای انطباق با الزامات قابلیت بهره‌برداری IBC نیست.

مطابق با بخش ۹,۵,۲,۲ استاندارد ACI ۳۱۸، درصورتی‌که خیزها محاسبه شوند، باید مطابق با بخش‌های ۹,۵,۲,۳ تا ۹,۵,۲,۵ محاسبه گردند. بخش ۹,۵,۲,۶ بیان می‌کند که این خیزهای محاسبه‌شده نباید از مقادیر ارائه‌شده در جدول ۹,۵(b) تجاوز کنند. برای سیستم‌های یک‌طرفه، بخش‌های ۹,۵,۲,۳ تا ۹,۵,۲,۵ در اکثر قریب به‌اتفاق موارد، رهنمودهای کافی برای تعیین سختی عضو و خیز ناشی از اثرات زمان را ارائه می‌دهند. استاندارد ACI ۴۳۵(۱۰) شامل بحث‌ها و مثال‌هایی برای کاربرد دقیق‌تر این روش‌ها است.

برای سیستم‌های دوطرفه، تعیین خیزهای آنی باید "اندازه و شکل پانل، شرایط تکیه‌گاه و ماهیت مهارها در لبه های پانل" را در نظر بگیرد. آیین‌نامه الزام دارد که E_c مطابق با آنچه در بخش ۸,۵,۱ ذکر شده است، تعیین گردد. ممان‌های اینرسی مؤثر باید با استفاده از معادله ۹-۸ تعیین شوند، مگر اینکه بتوان نشان داد مقادیر

جایگزین نتایج معقولی را ارائه می‌دهند. بااین‌حال، تعیین دقیق اینرسی مؤثر برای سیستم‌های دوطرفه نسبتاً پیچیده است و فراتر از اکثر روش‌های تحلیل دستی است. بخش ۴,۳,۱,۱ از استاندارد ACI ۴۳۵R-۹۵ به روش‌های تقریبی مناسب می‌پردازد. در طراحی‌های مدرن، خیز سیستم‌های دوطرفه معمولاً با استفاده از روش اجزای محدود تعیین می‌شود. هنگام به‌کارگیری این روش‌ها، باید توجه ویژه‌ای به نحوهٔ برخورد با شرایط تکیه گاه، مهارها و ترک‌خوردگی شود. درهرصورت، همان‌طور که ACI ۳۱۸ الزام می‌کند، این امر بر عهدهٔ طراح است که نشان دهد هرگونه تحلیلی که به کار می‌رود، "خیزهای محاسبه شده‌ای را ارائه می‌دهد که با نتایج آزمایش‌های جامع مطابقت معقولی داشته باشد". جالب است توجه داشته باشید که ACI ۳۱۸ همین آزادی عمل را در تعیین خیز بلندمدت اضافی مجاز نمی‌داند. به دلیل عدم وجود داده‌های کافی برای تأیید هر روش دیگری، بخش ۹,۵,۳,۴ استاندارد ACI ۳۱۸ الزام می‌کند که خیز بلندمدت اضافی باید با استفاده از بخش ۹,۵,۲,۵ استاندارد ACI تعیین گردد.

ج. المان‌های پیش‌تنیده – برخلاف الزامات ACI برای المان‌های بتن‌آرمه معمولی، ACI ۳۱۸ الزام حداقل عمقی برای المان‌های بتن پیش‌تنیده ندارد. بخش ۹,۵,۴ استاندارد ACI ۳۱۸ در مورد المان‌های خمشی طراحی‌شده مطابق با فصل ۱۸ استاندارد ACI ۳۱۸ اعمال می‌شود. ضوابط مرتبط با تحلیل اعضای خمشی پیش‌تنیده در بخش‌های ۱۸,۳ و ۱۸,۴ استاندارد ACI ۳۱۸ ارائه‌شده است.

بخش ۱۸,۳ فرضیات طراحی قابل‌قبولی را برای استفاده در تحلیل‌های مقاومت و قابلیت بهره‌برداری ارائه می دهد. بخش ۱۸,۳,۳ اعضای خمشی پیش‌تنیده را بر اساس تنش کششی فایبر حدی سطح بهره‌برداری در ناحیهٔ کششی پیش فشرده [۳۷] (f_t)، به سه دسته تقسیم می‌کند: نوع U (ترک نخورده)، نوع T (انتقالی) یا نوع (ترک‌خورده). بخش ۱۸,۴ الزامات قابلیت بهره‌برداری را مورد بحث قرار می‌دهد. این ضوابط شامل محدودیت هایی بر تنش‌های فشاری در بتن بلافاصله پس از انتقال پیش‌تنیدگی، پیش از افت های وابسته به زمان پس از طبقه‌بندی مطابق با بخش ۱۸,۳,۳، خواص عضو تعیین می‌گردد و خیزها مطابق با بخش ۹,۵,۴ استاندارد ACI ۳۱۸محاسبه می‌شوند.

جدول R۱۸,۳,۳ استاندارد ACI ۳۱۸ الزامات قابلیت بهره‌برداری را برای هر نوع از المان‌های خمشی خلاصه می‌کند. برای اعضای طبقه‌بندی شده به‌عنوان ترک نخورده، از I_g برای تعیین خیزهای آنی می‌توان استفاده کرد. برای اعضای خمشی طبقه‌بندی شده به‌عنوان C یا T، خیزها بر اساس مقطع ترک‌خوردهٔ معادل محاسبه می‌شوند. استفاده از ضوابط بخش ۹,۵,۲,۳ استاندارد ACI ۳۱۸ برای تعیین I_e قابل‌قبول است. تفسیر، خواننده را برای اطلاعات بیشتر در مورد خیز اعضای بتن پیش‌تنیدهٔ ترک‌خورده، به چندین منبع ارجاع می‌دهد.

برای المان‌های بتن پیش‌تنیده، خیز بلندمدت اضافی با درنظرگرفتن تنش‌ها در بتن و آرماتورهای تقویتی تحت بارهای ماندگار، از جمله اثرات خزش، انقباض و واهلش آرماتور پیش‌تنیدگی [۳۹]، باید تعیین شود. همچنین نیروهای مهاری توسط المان‌های مجاور غیر پیش‌تنیده در نظر گرفته شوند. راهنما را در منابع ۹ و ۱۰ می‌توان یافت.

۲. سیستم‌های سازه‌ای فولادی

سیستم‌های سازه‌ای فولادی شامل سیستم‌هایی با فولاد سازه‌ای نورد شده، تیرچه‌های با جان باز[۴۰]، المان فولادی سازه‌ای طراحی‌شده برای عملکرد مرکب با المان‌های بتنی، خرپای ساخته‌شده و المان‌های فولادی سرد نورد شده، می‌شود. این سند به بحث در مورد سه سیستم اول می‌پردازد.

الف. المان‌های فولادی غیرمرکب – طراحی قابلیت بهره‌برداری برای سیستم‌های فولادی غیرمرکب به مسائل مربوط به خیز استاتیکی و ارتعاش می‌پردازد. فولاد سازه‌ای تحت‌تأثیر اثرات زمان قرار نمی‌گیرد و می توان فرض کرد که در بارهای سطح خدمت به‌صورت الاستیک رفتار می‌کند؛ بنابراین، محاسبات مربوط به رفتار قابلیت بهره‌برداری ساده است. در بسیاری از موارد، کف یا سقف فولادی ممکن است برای مقابله با خیز ناشی از وزن خود سازه، پیش‌خیز[۴۱]داده شود. در این موارد، خیز مؤثری که توسط ساکنین و سطوح یا المان‌های غیرسازه‌ای در ساختمان تجربه می‌شود، تنها شامل خیزهایی است که پس از تکمیل سازه رخ می‌دهد.

ب. المان‌های فولادی مرکب – طراحی قابلیت بهره‌برداری برای سیستم‌های فولادی مرکب شبیه به المان های فولادی غیرمرکب است. تفاوت در این است که بتن به‌عنوان المان‌های فشاری در سیستم گنجانده شد. رایج‌ترین کاربرد آن در ساختمانی کف تیر فولادی و دال بتنی مرکب است. برای این کاربردها، دال کف بتنی به‌عنوان بال فشاری المان خمشی تیر T کنش می‌کند. هرگونه خزش یا انقباض در بال فشاری بتن به طور اجتناب‌ناپذیر به خیز سیستم در طول زمان اضافه می‌شود.

پیوست راهنمای بخش L۳ استاندارد ANSI/AISC ۳۶۰[۴۲] (خیزها) بیان می‌کند که "خیزهای اضافی از انقباض و خزش بتن باید در نظر گرفته شود". بااین‌حال، تفسیر استاندارد ANSI/AISC ۳۶۰ در بخش L۳,۲نشان می‌دهد که در ایالات متحده، به‌طورکلی انقباض و خزش بال فشاری بتنی در طراحی سیستم‌های کف مرکب در نظر گرفته نمی‌شود. علاوه بر این، تفسیر ادامه می‌دهد که "هیچ راهنمای مستقیمی برای محاسبهٔ خیز بلندمدت ناشی از خزش و انقباض وجود ندارد ."

در تضاد با نظرات مطرح شده در استاندارد ANSI/AISC ۳۶۰، Viest و همکاران (۱۱) نشان می‌دهند که خیز بلندمدت ناشی از انقباض بال فشاری بتنی ممکن است قابل‌توجه باشد. آزمایش‌های Robinson (۱۲) نشان می‌دهد که خیزهای ناشی از انقباض به ۱۰۰۰ / دهانه تا ۱۲۰۰ / دهانه می‌توانند برسند. Viest (۱۳) روش ساده‌ای را برای پیش‌بینی خیز اضافی ناشی از انقباض پیشنهاد کرد. این روش شامل مدل‌سازی کرنش انقباض به‌عنوان نیروی فشاری معادل اعمال‌شده در مرکز دال است. خیز انقباض اضافی تخمین زده‌شده، به عنوان خیز تیر ناشی از لنگر ثابت در نظر گرفته می‌شود که حاصل‌ضرب نیروی فشاری در خارج از مرکزیت نسبت به محور خنثی الاستیک است. در صورت نبود اطلاعات دقیق‌تر، کرنش انقباض معادل ۲۰۰ ریز لحاظ می‌گردد.

به‌طورکلی، تغییر شکل‌های بلندمدت ناشی از خزش در سیستم‌های کف مرکب معمولی کم است، مگر اینکه دهانه‌ها بلند باشند، بارهای ماندگار نسبتاً زیاد باشند یا درصد کنش مرکب در دال نسبتاً زیاد باشد (۱۱). همان‌طور که در تمام تحلیل‌های قابلیت بهره‌برداری، قضاوت مهندسی و تجربه موردنیاز است.

ج. المان‌های تیرچه مشبک فولادی – تیرچه‌های مشبک فولادی، المان‌های خمشی فولادی سازه‌ای هستند و به همین ترتیب با چند شرط خاص، مشابه تیرهای فولادی با آن‌ها می‌توان رفتار کرد.

سیستم‌های کف و سقف تیرچه مشبک در مقایسه با سیستم‌های بتنی و سایر سیستم‌های فولادی سازه‌ای، نسبت سختی به جرم نسبتاً بالایی دارند؛ بنابراین، آن‌ها به طور سنتی به دلیل فقدان میرایی ذاتی در سیستم های سنگین‌تر، مستعد مشکلات ارتعاش هستند. مؤسسهٔ تیرچه فولادی آمریکا SJI [۴۴] (Steel Joist Institute) چندین مرجع دارد که در آن‌ها در مورد طراحی سیستم‌های تیرچه برای جلوگیری از مشکلات ارتعاش بحث شده است (۱۴، ۱۵).

تیرچه‌های مشبک فولادی با پیش‌خیزهای [۴۵] استاندارد عرضه می‌شوند، مگر اینکه غیر از این توسط طراح ای مشخص گردد. این پیش خیزها با خیزهای مورد انتظار بار مرده مرتبط هستند که بر اساس ظرفیت تیرچه تعیین می‌شوند؛ بنابراین، در مواردی که اندازه تیرچه مشخص‌شده به عوامل دیگری غیر از مقاومت بار مرده؛ مانند عمق یکنواخت، محدودیت‌های دقیق خیز بار زنده یا بارهای زندهٔ سنگین مرتبط باشد، پیش خیزهای استاندارد ممکن است نامناسب باشند. در چنین مواردی، طراح متخصص باید پیش خیز موردنیاز را در اسناد قرارداد مشخص کند.

برخلاف المان‌های تیر فولادی سازه‌ای، اتصالات تیرچه‌ها مگر اینکه تیر تیغه تحتانی آن‌ها کشیده شوند، تقریباً شبیه رفتار مفصلی عمل می‌کنند؛ بنابراین، بخشی از محافظه‌کاری ذاتی در طراحی خیز سیستم‌های تیر بال‌پهن، به دلیل گیرداری جزئی در اتصالات در سیستم‌های تیرچه قابل‌اعمال نیست.

در نهایت، تیرچه‌های مشبک فولادی همان رابطه بین سختی خمشی و برشی را که تیرهای فولادی بال‌پهن دارند، ندارند. در برخی موارد، این امکان وجود دارد که تغییر شکل برشی به‌اندازه‌ای قابل‌توجه باشد که نیاز به بررسی داشته باشد. انتظار می‌رود که تیرچه مشبک فولادی تقریباً ۱۵ درصد تغییر شکل بیشتری نسبت به عضوی با جان توپر داشته باشد. هنگامی‌که از فرمول تیر معمولی برای محاسبه‌ی خیز تیرچه استفاده می‌شود، باید ضریب معادل ۱٫۱۵ برای درنظرگرفتن تغییر شکل برشی جان اعمال گردد.

ازآنجایی‌که تیرچه‌های مشبک فولادی معمولاً به‌عنوان محصولی مهندسی‌شده عرضه می‌شوند، مهندس طراح باید سختی خمشی تقریبی تیرچه مشخص را با استفاده از معادلهٔ زیر که توسط مؤسسهٔ تیرچه فولادی (۱۶) ارائه‌شده است، تعیین کند.

برای تیرچه‌ها

$$I_j = 26.767(W_{ALL})(L^3)(10^{-6})$$

NPLD [۴۶] (تعداد فواصل تیر × بار کل نقطه پنل × طول تیر ÷ عمق مؤثر تیر) برای تیرچه

$$I_{jg} = 0.027$$

که در آن:

- W_{LL} بار زنده اسمی (plf) است که باعث ایجاد تقریبی خیز ۳۶۰/۱ دهانه از جدول بار طراحی تنش مجاز می‌شود.
- N تعداد فاصله‌های تیرچه
- P کل بار پنل (کیپس)
- d عمق مؤثر تیرچه (اینچ)
- L دهانهٔ مرکز به مرکز (فوت) عضو من‌های ۰٫۳۳ فوت است.

همان‌طور که در مورد پیش خیز گفته شد، اگر طراح متخصص به‌سختی عضو خاصی نیاز داشته باشد، این اطلاعات باید به طور واضح در اسناد قرارداد ذکر شود و قبل از تهیهٔ نقشه‌های کارگاهی با تأمین‌کنندهٔ تیرچه مورد بحث قرار گیرد.

۳. سیستم‌های چوبی

سیستم‌های سازه‌ای متعدد چوبی یا تیر چوبی برای استفاده در ساختمان‌ها وجود دارد. به‌طورکلی، این سیستم‌ها را به دودسته می‌توان تقسیم کرد. یک دسته شامل سیستم‌های چوبی ابعادی است که از مصالح چوبی "طبیعی" برش ارائه‌شده به المان‌های مختلف تشکیل شده است که سپس به مجموعه سازه‌ای متصل می‌شوند. دومین دسته شامل سیستم‌های چوبی مهندسی‌شده است که از المان‌های ساخته شده از مصالح چوبی طبیعی تشکیل شده است که با استفاده از چسب یا مصالح شیمیایی دیگر برای تولید مصالح سازه‌ای یکنواخت‌تر، همگن‌تر و پایدارتر ترکیب یا ساخته‌شده‌اند.

هنگامی‌که سیستم‌های چوبی طبیعی در قاب سازه‌ای با المان‌های فولادی و بنایی گنجانده می‌شوند، طراحی قابلیت بهره‌برداری باید شامل سازگاری خیز و انقباض باشد. توجه ویژه باید به شرایط زیر معطوف گردد:

۱. قاب کف یا سقف چوبی که به‌موازات قاب فولادی قرار گرفته است،
۲. دیوارهای تیرکشی چوبی باربر که در مجاورت دیوارهای واحد بنایی بتنی (CMU) یا دیوارهای بتن‌آرمه قرار گرفته‌اند،
۳. دیوارهای تیرکشی چوبی باربر که در مجاورت ستون‌های فولادی قرار گرفته‌اند،
۴. دیوارهای چوبی مجاور با ارتفاع‌های مختلف به دلیل دیوارهای فونداسیون در سطوح پایین‌تر.

الف. سیستم‌های چوبی طبیعی – چوب به‌عنوان مصالحی طبیعی، ایزوتروپیک (همسان‌گرد) نیست و در طول زمان پایدار نیست. چوب تحت بارهای ماندگار هم در معرض انقباض و هم در معرض خزش قرار خواهد گرفت. این اثرات وابسته به رطوبت و خشک‌شدن مصالح است. بااین‌حال، مدول الاستیسیته نسبتاً پایدار بوده و در واقع با خشک‌شدن المان‌های چوبی افزایش می‌یابد. به طور معمول، انتظار می‌رود که تغییر شکل ناشی از خزش تقریباً معادل تغییر شکل الاستیک اولیه باشد؛ بااین‌حال این امکان وجود دارد که چوب "تر" در هنگام خشک‌شدن، چهارتا پنج برابر خیز اولیه، خزش داشته باشد (۱۷). این امر توضیح می‌دهد که چرا آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی به طور معمول شامل ضوابطی برای جلوگیری از استفاده از چوب "تر" در کاربردهای سازه‌ای هستند.

برای مقابله با افزایش خیز ناشی از خزش، "مشخصات طراحی ملی برای سازه‌های چوبی" (NDS) الزام می کند که خیزهای آنی ناشی از مؤلفه بلندمدت بار طراحی، برای شرایط بهره‌برداری خشک با ضریب ۱,۵ و برای شرایط بهره‌برداری مرطوب با ضریب ۲,۰ ضرب شوند. شرایط بهره‌برداری مرطوب به‌عنوان شرایطی تعریف می گردد که در آن رطوبت چوب در بهره‌برداری برای مدت طولانی از ۱۹ درصد تجاوز کند.

برای المان‌های خمشی چوبی طبیعی، مدول الاستیسیته‌ای که برای محاسبهٔ خیزها استفاده می‌شود، برای درنظرگرفتن بخش‌برشی تغییر شکل، تقریباً ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. این امر برای اکثر قریب به‌اتفاق طرح های تیر مناسب است. تغییر شکل‌های برشی ممکن است در تیرهای کوتاه با بارگذاری سنگین قابل‌توجه باشد. در چنین مواردی، ممکن است آنالیز اضافی موردنیاز باشد.

بخش ۲۳۰۴,۳,۳ استاندارد IBC دیوارهای چوبی و پارتیشن‌های باربر را به حداکثر دوطبقه و یک سقف محدود می‌کند، مگر اینکه تحلیلی انجام شود تا نشان دهد که حرکات تفاضلی [۴۷]ناشی از انقباض دیوارهای قاب تأثیر نامطلوبی بر سازه یا سیستم‌های ساختمان نخواهد داشت. به‌عنوان روشی جایگزین، ممکن است سیستم‌ها به‌گونه‌ای طراحی شوند که انقباض تفاضلی [۴۸]را در خود جای دهند.

برای خرپای چوبی ساخته شده با المان‌های چوبی چهارتراش، اثر وابسته به زمان دیگری به نام "کاهش تدریجی و دائمی ارتفاع یا شکل اعضای چوبی خرپا بواسطه اثرات بلند مدت بارگذاری" وجود دارد. کاهش تدریجی و دائمی ارتفاع یا شکل اعضای چوبی خرپا بواسطه اثرات بلند مدت بارگذاری، خیزی است که ناشی از تغییر شکل غیرالاستیک بین الیاف چوب و لغزش در اتصالات خرپا است. برای درنظرگرفتن تغییر شکل ناشی از " کاهش تدریجی و دائمی ارتفاع یا شکل اعضای چوبی خرپا بواسطه اثرات بلند مدت بارگذاری "همراه با خیز الاستیک و خزش محاسبه‌شدهٔ خرپایی چوبی، باید از تجربه و قضاوت مهندسی استفاده شود.

ب. سیستم‌های چوبی مهندسی‌شده – سیستم‌های چوبی مهندسی‌شده شامل المان‌هایی مانند تیرهای چوب لمینیت شده (گلولام)، چوب مهندسی شده (پارالام)، چوب لایه‌ای روکش‌دار (LVL)، تخته چندلا، تیرهای I شکل پیش‌ساختهٔ چوبی، الوارهای مرکب سازه‌ای و پانل‌های چوبی سازه‌ای می‌شوند. [۴۹]هر یک سیستم‌ها با مصالح چوبی مهندسی‌شده برای برآورده‌کردن الزامات عملکردی خاص سروکار دارند. طراحی قابلیت بهره‌برداری مرتبط با این سیستم‌ها باید با استفاده از اطلاعات مناسب موجود از سازنده محصول و / یا مشخصات موجود در صنعت به همراه دانش و قضاوت مهندسی خوب تکمیل شود.

I.۵ طراحی لرزه‌ای برای قابلیت بهره‌برداری

طراحی قابلیت بهره‌برداری برای سازه‌هایی که تحت‌تأثیر نیروهای لرزه‌ای قرار خواهند گرفت، شامل چندین مرحله است. اول، عملکرد موردنظر سیستم در هنگام وقوع رویداد لرزه‌ای طراحی باید تعیین شود. سپس، سیستم سازه‌ای باید تحلیل و اندازه‌گیری شود. سیستم‌های غیرسازه‌ای که شامل المان‌های معماری و همچنین المان های سیستم ساختمان می‌شوند، باید انتخاب و جزئیات آن‌ها مشخص گردد. در نهایت، خیزهای سیستم سازه ای و جزئیات سیستم‌های غیرسازه‌ای باید بررسی و ارزیابی شوند تا تأیید گردد که سطح عملکرد مورد انتظار با سطح عملکرد مطلوب مطابقت داشته باشد.

۱. عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار

سطح آیین‌نامه‌ای عملکرد لرزه‌ای سازه باتوجه‌به "دستهٔ خطر" انتخاب‌شده از جدول ۱۶۰۴,۵ استاندارد IBC یا جدول ۱,۵-۱ استاندارد ASCE/SEI ۷ تعریف می‌شود. بحثی مفصل در مورد عملکرد مورد انتظار تسهیلات در هنگام مواجهه با نیروهای لرزه‌ای در تفسیر "ضوابط لرزه‌ای پیشنهادی NEHRP" [۵۰](۱۸) ارائه‌شده هدف از رویه‌های طراحی لرزه‌ای موجود در ASCE/SEI ۷ به‌صورت گرافیکی در شکل I.۱۰ ارائه‌شده است. محور عمودی رویداد لرزه‌ای را نشان می‌دهد، که در آن بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی محتمل (MCE) نادرترین رویداد است. (لازم به ذکر است که بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی محتمل با بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی در نظر گرفته شده در ASCE/SEI ۷ متفاوت و بزرگ‌تر است.) محور افقی سطح عملکرد مورد انتظار تسهیلات در هنگام وقوع رویداد لرزه‌ای را نشان می‌دهد. سطوح عملکرد تسهیلات به‌طورکلی در سند FEMA P-۷۵۰-۱/۲۰۰۹ شرح ارائه‌شده است. در ادامه خلاصه‌ای کلی از این سطوح عملکرد آمده است:

- **الف. آستانه فروریزش:** المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای به‌شدت آسیب‌دیده‌اند. تیغه‌های داخلی و خارجی ممکن است به طور جزئی یا کلی تخریب شوند. قاب سازه هنوز ایستاده است. تسهیلات کاملاً از بین رفته و باید تخریب شود.
- **ب. ایمنی جانی:** سازه و المان‌های غیرسازه‌ای آسیب‌دیده‌اند. سیستم‌های ایمنی جانی ساختمان مانند برق اضطراری و کنترل آتش‌سوزی کار می‌کنند. ساکنان می‌توانند بدون تلفات جانی از ساختمان خارج شوند. تیغه های داخلی و خارجی ممکن است آسیب‌دیده باشند؛ اما مسیرهای خروج فرونریخته‌اند و خطری برای ساکنان ساختمان ایجاد نمی‌کنند. ممکن است تسهیلات کاملاً از بین رفته باشد و نیاز به تخریب داشته باشد.
- **ج. قابلیت استفاده بی‌وقفه:** سازه آسیب‌ندیده است. آسیب‌های غیرسازه‌ای به نازک‌کاری‌ها و المان‌هایی که برای عملکرد موردنیاز نیستند، محدود می‌شود. سیستم‌های ایمنی جانی ساختمان مانند برق اضطراری و کنترل آتش‌سوزی کار می‌کنند. ممکن است کارهای جزئی مانند تعویض درز لرزه‌ای، تعمیر، حذف یا تعویض نازک‌کاری‌های آسیب‌دیده و تعمیر یا تعویض تجهیزات و المان‌های غیرضروری موردنیاز باشد.
- **د. خدمات‌رسانی بی‌وقفه:** سازه آسیب‌ندیده است. آسیب‌های غیرسازه‌ای به نازک‌کاری‌ها و المان‌هایی که برای عملکرد موردنیاز نیستند، محدود می‌گردد. سیستم‌های ایمنی جانی ساختمان مانند برق اضطراری و کنترل آتش‌سوزی کار می‌کنند. تمام تجهیزات و المان‌های معماری موردنیاز برای عملکرد بدون آسیب باقی می‌مانند. ممکن است کارهای جزئی مانند جایگزینی درز لرزه‌ای [۵۱] و تعمیر، حذف یا تعویض نازک‌کاری‌های آسیب مناطق جانبی موردنیاز باشد.

باتوجه‌به این سطوح عملکرد، طراحی قابلیت بهره‌برداری مربوط به فعالیت‌های لرزه‌ای شامل مطابقت‌دادن تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده با المان‌ها و جزئیات سیستم ساختمان برای رسیدن به نتیجهٔ مطلوب است.

۲. محدودیت‌های تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) لرزه‌ای

بخش ۱۶۰۴,۳ استاندارد IBC به بخش ۱۲,۱۲,۱ استاندارد ASCE/SEI ۷ در مورد محدودیت‌های دریفت بهره‌برداری ناشی از بارهای زلزله اشاره می‌کند. این محدودیت‌ها در جدول ۱۲,۱۲,۱ ارائه‌شده است که در جدول I.۵ بازتولید شده است. این بخش محدودیت‌هایی را برای دریفت طبقه‌ی طراحی‌شده با استفاده از تحلیل الاستیک مرتبه‌ی اول با بارهای نهایی مشخص می‌کند. این محدودیت‌ها با درنظرگرفتن نیاز به نتایج عملکرد زیر توسعه‌یافته‌اند:

- پایداری سازه تحت تغییر شکل‌های الاستیک و غیرالاستیک.
- محدودکردن آسیب به المان‌های باربر لرزه‌ای.[۵۲]
- آسیب محدود به المان‌های غیرسازه‌ای برای محافظت از جان انسان‌ها.

کنترل آسیب کلی به المان‌های غیرسازه‌ای یا نازک‌کاری‌ها در توسعهٔ محدودیت‌های دریفت طبقه در نظر گرفته نشده است.

استانداردهای IBC و ASCE/SEI ۷ رویهٔ طراحی لرزه‌ای را اتخاذ کرده‌اند که المان‌های سازه‌ای را با فرض مقدار تجویزشده‌ای از رفتار غیرالاستیک متناسب می‌کند. فرض و درنظرگرفتن رفتار غیرالاستیک باعث کاهش قابل‌توجه نیروهای طراحی به زیر مقادیر مورد انتظار از پاسخ الاستیک به حرکت زمین طراحی‌شده می‌گردد. این کاهش در ضریب اصلاح پاسخ (R)، ارائه‌شده است. بااین‌حال، رویهٔ طراحی شامل تحلیل الاستیک سازهٔ

غیرالاستیک فرضی است. برای تطابق با این ناسازگاری، تغییر شکل الاستیکی که با استفاده از نیروهای کاهش یافته محاسبه می‌شود، توسط ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان (Cd)، برای بزرگ‌نمایی تغییر شکل‌های در سازه در پاسخ غیرالاستیک به حرکت زمین طراحی‌شده، تقویت می‌گردد.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، معیارهای قابلیت بهره‌برداری که به‌عنوان بخشی از هر فرایند طراحی قابلیت بهره برداری پذیرفته می‌شوند، باید احتمال وقوع وضعیت حالت حدی و رفتار ناشی از آن را در نظر بگیرند. احتمال وقوع حرکت زمین طراحی لرزه‌ای ارائه‌شده توسط ASCE/SEI ۷ کمی برای ایجاد خطر لرزه‌ای یکنواخت تغییر می‌کند. به‌طورکلی، احتمال وقوع یا تجاوز از حرکت زمین طراحی لرزه‌ای، دو درصد در ۵۰ سال است. این به‌معنای دوره‌ی بازگشت تقریباً ۲۵۰۰ سال می‌باشد. طراحان هنگام طراحی یا ارزیابی تسهیلات برای پاسخ قابلیت بهره‌برداری به رویداد لرزه‌ای طراحی، باید احتمال کم وقوع نیروهای لرزه‌ای در سطح طراحی را همراه با دقت نسبی نیروهای پیش‌بینی‌شده و فرضیات ساده‌سازی‌شده در تحلیل سازه‌ی لرزه‌ای خود در نظر بگیرند.

۳. طراحی لرزه‌ای برای اجزای غیرسازه‌ای

طراحی قابلیت بهره‌برداری برای لرزه‌خیزی، بدون رعایت ضوابط فصل ۱۳ استاندارد ASCE/SEI ۷ کامل نیست. این فصل حداقل معیارهای طراحی را برای اجزای غیرسازه‌ای که به طور دائم به سازه‌ها متصل هستند و همچنین اتصالات و تکیه‌گاه‌های ثانویه آن‌ها تعیین می‌کند. این ضوابط با استفاده از ضریب اهمیت، ضریب تشدید پاسخ ناشی از اجزاء غیر سازه ای (CAF) و ضریب اصلاح پاسخ (R)، مقادیر نیروها و تغییر مکان‌هایی را که باید در طراحی در نظر گرفته شوند، بر اساس نوع المان یا مؤلفه مشخص می‌کنند. بسیاری از دسته‌های اجزای غیرسازه‌ای در تسهیلاتی که برای فعالیت‌های لرزه‌ای کم تا متوسط (دسته‌های طراحی لرزه‌ای A، B یا C) طراحی‌شده‌اند، از این الزامات معاف هستند. جدول I.۶ معافیت‌های ارائه‌شده در بخش ۱۳,۱,۴ استاندارد ASCE/SEI ۷ را فهرست می‌کند.

I.٦ محدوده سند

هدف از این راهنما ارائه اطلاعاتی است که به مهندسان سازهٔ فعال در طراحی سازه‌های ساختمانی در استفاده از ضوابط قابلیت بهره‌برداری استاندارد IBC کمک کند. اگرچه بخش زیادی از بحث و نمونه‌های موجود در این راهنما به برآورد و پیش‌بینی تغییر شکل‌های سازه‌ای می‌پردازد، هدف این نیست که روش‌هایی را ارائه دهد که مهندس سازه بتواند تغییر شکل‌های واقعی مورد انتظار در سازه‌های واقعی را به طور دقیق پیش‌بینی کند. خواننده باید درک کند که بین برآوردن الزامات آیین‌نامه و استفاده از اصول مهندسی، مشخصات مصالح و مدل های ریاضی برای توسعه پیش‌بینی‌های دقیق از رفتار سازه‌ای تفاوت قابل‌توجهی وجود دارد.

توسعهٔ ضوابط آیین‌نامه IBCای لزوماً شامل فرضیات ساده‌سازی شده در تحلیل و برآوردهای محافظه‌کارانه از مشخصات مصالح و همچنین بارهای پیش‌بینی‌شده است. این روش‌های تقریبی همراه با معیارهای قابلیت بهره برداری مبتنی بر نظر حرفه‌ای با راهنمایی تجربه و تحقیقات نسبتاً کمی ترکیب‌شده‌اند تا روشی را ایجاد کنند که از لحاظ تاریخی، سازه‌هایی بدون مشکلات قابلیت بهره‌برداری تولید کند. این واقعیت که روش‌های فعلی طراحی و ارزیابی قابلیت بهره‌برداری، عملکرد غیرقابل‌قبول قابلیت بهره‌برداری را کاهش داده‌اند، به معنای دقیق بودن این روش نیست. نتیجه نشان می‌دهد که فرایندهای طراحی و ارزیابی گنجانده شده در آیین‌نامه‌ها، استانداردها و این راهنما، نتایج محافظه‌کارانه‌ای را تولید می‌کنند که در صورت اعمال صحیح، از مشکلات

قابلیت بهره‌برداری جلوگیری می‌کنند؛ بنابراین، خواننده می‌تواند انتظار داشته باشد که خیزهای اندازه‌گیری شدهٔ سازه‌ها در محل با خیزهای پیش‌بینی‌شده توسط روش‌های مورد بحث در این راهنما متفاوت باشد. علاوه بر این، خیزهای پیش‌بینی‌شده توسط روش‌های مورد بحث در این راهنما به‌اندازهٔ برخی از روش‌های دیگر موجود در نشریات و مقالات تحقیقی دقیق نخواهند بود.

اگرچه این راهنما تلاش می‌کند تا نمونه‌های طراحی و بحث‌هایی را بر اساس موقعیت‌های "دنیای واقعی" ارائه دهد، اما دامنهٔ آن لزوماً به موقعیت‌های ساده‌تر و سرراست‌تر محدود می‌گردد. علاوه بر این، این راهنما تنها شرایط کلی و رویه‌های تحلیل تقریبی ساده‌شده را برای بحث و ارزیابی ارائه می‌دهد. این مسئولیت مهندس باتجربه است که از قضاوت خود در به‌کارگیری اطلاعات ارائه‌شده در این راهنما برای مشکلات خاص و منحصربه‌فرد قابلیت بهره‌برداری استفاده کند. این قضاوت باید بر اساس تجربه همراه با بررسی و مشاوره با گزارش‌های تحقیقاتی اصلی، مقالات، استانداردها و تفسیرهایی باشد که در این راهنما به آن‌ها ارجاع ارائه‌شده است.

مثال‌های موجود در این راهنما، ارزیابی سازه‌های نمونه را برای تعیین اینکه آیا آن‌ها الزامات ضوابط قابلیت بهره برداری IBC را برآورده می‌کنند، نشان می‌دهند. سیستم‌های سازه‌ای ارائه‌شده برای برآوردن الزامات مقاومت IBC و استانداردهای مرجع طراحی‌شده‌اند. این احتمال وجود دارد که طرح‌های ارائه‌شده محافظه‌کارانه یا بیش از حد ساده به نظر برسند، زیرا تمرکز مثال‌ها بر عملکرد قابلیت بهره‌برداری است. مگر اینکه با ارزیابی قابلیت بهره‌برداری مرتبط باشد، فرضیات، تحلیل و تصمیمات طراحی مرتبط با طراحی مقاومت در مباحث گنجانده نشده‌اند. این طرح‌ها با استفاده از برنامه طراحی تجاری در دسترس تکمیل‌شده‌اند و باید قابل‌قبول فرض شوند.

I.۷ استفاده از این سند

عملکرد قابلیت بهره‌برداری سازه همیشه باید بر اساس عملکرد المان‌های سازه‌ای یا سیستم‌های المان‌های سازه ای درون کل سیستم ساختمان ارزیابی شود؛ بنابراین، این راهنما برای ارائه مثال‌هایی برای طراحی و ارزیابی قابلیت بهره‌برداری در سیستم کلی ساختمان تنظیم شده است. برای رسیدن به این هدف، کتاب حاوی ۲۶ مثال خاص از طراحی یا ارزیابی قابلیت بهره‌برداری است که در هفت ساختمان نمونه ترتیب ارائه‌شده و در آن‌ها به کار گرفته شده است. هر فصل شامل اطلاعات اولیه لازم برای تعیین عملکرد قابلیت بهره‌برداری و چندین مثال حل شده در مورد ساختمان نمونه مورد بحث در آن فصل است؛ بنابراین، خواننده اطلاعات را از سه طریق می تواند جستجو کند: بر اساس مسئله قابلیت بهره‌برداری، بر اساس نوع ساختمان یا بر اساس سیستم سازه‌ای.

۱. بر اساس مسئله قابلیت بهره‌برداری: لیست مثال‌های حل شده ۱ تا ۲۵ را مرور کنید و به موارد موردعلاقه خود بروید.
۲. بر اساس نوع ساختمان: عناوین فصول را برای یافتن ساختمان نمونه فهرست شده در فصول ا تا ه مرور کنید که بهترین تطابق را با نوع یا انواع ساختمان موردعلاقه داشته باشد.
۳. بر اساس سیستم سازه‌ای: توضیحات مربوط به سیستم سازه‌ای در عناوین فصول را برای یافتن موارد موردعلاقه خود مرور کنید.

هر فصل یا مثال را به طور مستقل می‌توان بررسی کرد. ارجاعات به بخش‌های قبلی کتاب به‌ندرت استفاده می گردد. تحلیل‌ها و ارزیابی‌های کامل قابلیت بهره‌برداری برای راحتی خواننده در هر مثال به طور کامل با ذکر منابع تکرار می‌شوند.

منابع

۱. Galambos, T.V., and Ellingwood, B., “Serviceability Limit States: Deflection,” Journal of Structural Engineering , ASCE, ۱۹۸۶, ۱۱۲(۱), ۶۷–۸۴.

۲. Griffis, Lawrence G., “Serviceability Limit States Under Wind Load, ” Engineering Journal , ۱۹۹۳, ۳۰(۱), ۱–۱۶.

۳. Cooney, R.C. and King, A.B., “Serviceability Criteria for Buildings,” BRANZ Report SR۱۴, Building Research Association of New Zealand, Porirua, New Zealand, ۱۹۸۸.

۴. Ad Hoc Committee on Serviceability Research (۱۹۸۶), “Structural Serviceability: A Critical Appraisal and Research Needs, ” Journal of Structural Engineering , ۱۱۲(۱۲), ۲۶۴۶–۲۶۶۴.

۵. American Institute of Steel Construction, Steel Design Guide ۳ - Serviceability Design Considerations for Steel Buildings , ۲nd Edition, Michael West and James Fisher, March, ۲۰۰۴.

۶. International Organization for Standardization (ISO), “Bases for the Design of Structures-Deformations of Buildings at Serviceability Limit States, ” ISO ۴۳۵۶, International Organization for Standardization.

۷. Bachmann and Ammann, ۱۹۸۷, on vibrations.

۸. Ellingwood, B. and Tallin, A., ”Structural Serviceability: Floor Vibrations, ” Journal of Structural Engineering , ۱۱۰(۲), ۴۰۱–۴۱۸.

۹. ACI ۲۰۹R-۹۲, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ” (Reapproved ۲۰۰۸), ACI Committee ۲۰۹, American Concrete Institute, Farmington, MI, ۱۹۹۲.

۱۰. Subcommittee ۵, ACI Committee ۴۳۵, “Deflections of Prestressed Concrete Members (ACI ۴۳۵,۱R-۶۳),” ACI Journal, Proceedings V.۶۰, No.۱۲, Dec ۱۹۶۳, ۱۶۹۷–۱۷۲۸.

۱۱. Composite Construction Design for Buildings, Viest, I.M, et al., American Society of Civil Engineers and McGraw-Hill, Inc., ۱۹۹۷.

۱۲. E.Y.L. Chien and J.K. Ritchie, Composite Floor Systems , Canadian Institute of Steel Construction, Willlowdale, Ontario, Canada, ۱۹۸۴.

۱۳. I.M.Viest, R.S. Fountain, and R.C.Singleton, Composite Construction in Steel and Concrete for Bridges and Buildings , McGraw-Hill, New York, ۱۹۵۸.

۱۴. Steel Joist Institute, Standard Specifications , ۴۳rd Edition.

۱۵. Wood Engineering and Construction Handbook, Faherty, Keith F., Willamson, Thomas G. editors, ۳rd Edition, McGraw-Hill, Inc., ۱۹۹۹, ۱,۱۴–۱,۱۵.

۱۶. Federal Emergency Management Agency, “National Earthquake Hazard Reduction Program Recommended Seismic Provisions for New Build ings and Other Structures, ”