

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای مقاوم سازی ساختمان ها در مناطق دارای فرونشست زمین

ضابطه / نشریه شماره □□□□

آخرین ویرایش: ۱۹-۰۵-۱۴۰۵

تهیه و کنترل «راهنمای مقاوم سازی ساختمان‌ها در مناطق دارای فرونشست زمین» [ضابطه/نشریه شماره ---]

اعضای گروه تهیه کننده:

سید طاها طباطبایی عقدا	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکتری عمران گرایش خاک و پی
علی قنبری	دانشگاه خوارزمی	دکتری ژئوتکنیک
فاطمه تهمورس	دانشگاه خوارزمی	کارشناسی ارشد ژئوتکنیک
وحید شیرگیر	دانشگاه خوارزمی	دکتری ژئوتکنیک
پرهام تیرزان	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناسی ارشد ژئوتکنیک

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل یک- کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- ضرورت تدوین راهنما
۲	۳-۱- هدف
۳	۴-۱- دامنه کاربرد
۳	۵-۱- ارتباط با سایر ضوابط و نشریات داخلی
۳	۶-۱- رویکرد حاکم
۴	۷-۱- ساختار راهنما
۵	۸-۱- تعاریف
۵	۱-۸-۱- فرونشست زمین
۵	۲-۸-۱- نشست تفاضلی
۵	۳-۸-۱- نرخ نشست یا نرخ تغییر شکل
۵	۴-۸-۱- گرا دیان نشست
۶	۵-۸-۱- تغییر شکل ساختمان
۶	۶-۸-۱- تزریق
۶	۷-۸-۱- ریز شمع
۶	۸-۸-۱- پایش
۶	۹-۸-۱- نقطه مبنا
۶	۱۰-۸-۱- مقاوم سازی
۶	۱۱-۸-۱- تغییر شکل فعال
۷	۱۲-۸-۱- کجی پیش رونده
۷	۱۳-۸-۱- اقدام اضطراری
۸	فصل دو- مبانی فرونشست و اثر آن بر ساختمان ها
۹	۱-۲- مقدمه
۹	۲-۲- سازوکارهای فرونشست زمین
۹	۱-۲-۲- پیامدهای سطحی و ژئومورفولوژیکی
۱۰	۲-۲-۲- پیامدهای هیدروژئولوژیکی
۱۰	۳-۲-۲- پیامدهای سازه ای و آسیب به شریان های حیاتی
۱۱	۳-۲- اثرات فرونشست بر ساختمان ها
۱۱	۱-۳-۲- الگوی یکنواخت نشست
۱۲	۲-۳-۲- الگوی غیر یکنواخت نشست
۱۲	۳-۳-۲- تفکیک فرونشست منطقه ای از نشست موضعی

۱۵	فصل سه- تحلیل آسیب‌ها
۱۶	۱-۳- مقدمه
۱۶	۲-۳- اصول کلی تحلیل آسیب
۱۷	۳-۳- اطلاعات و شواهد مورد نیاز
۱۷	۱-۳-۳- مطالعات دفتری
۱۸	۲-۳-۳- بازدید میدانی و تهیه نقشه آسیب
۱۸	۴-۳- سازوکارهای محتمل ایجاد آسیب
۱۸	۱-۴-۳- نشست غیریکنواخت
۱۹	۲-۴-۳- کرنش افقی کششی
۱۹	۳-۴-۳- کرنش افقی فشاری
۱۹	۴-۴-۳- جابه‌جایی افقی و عوامل موضعی هم‌زمان
۲۰	۵-۳- منشأ یابی و طبقه‌بندی ترک‌ها
۲۰	۱-۵-۳- اصول توصیف و محدودیت تفسیر ترک
۲۰	۲-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس نقش جزء آسیب‌دیده
۲۲	۳-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس منشأ احتمالی
۳۱	۴-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس سازوکار مکانیکی
۳۴	۵-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری
۴۱	۶-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس وضعیت فعالیت
۴۲	۶-۳- الگوهای آسیب در سیستم‌های مختلف
۴۲	۱-۶-۳- ساختمان‌های بنایی
۴۲	۲-۶-۳- سازه‌های بتن‌آرمه
۴۳	۳-۶-۳- سازه‌های فولادی
۴۳	۴-۶-۳- پی
۴۴	۵-۶-۳- اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات
۴۴	۷-۳- تشخیص روند تغییرات
۴۴	۱-۷-۳- تفکیک مفاهیم فعالیت
۴۵	۸-۳- ارتباط الگوی آسیب با پروفیل تغییر شکل
۴۵	۱-۸-۳- تغییر شکل مقعر و محدب
۴۶	۲-۸-۳- غلبه کرنش کششی
۴۶	۳-۸-۳- غلبه کرنش فشاری
۴۶	۹-۳- نمونه‌های عینی از ترک‌های ناشی از فرونشست در مطالعات میدانی
۴۷	۱-۹-۳- ترک‌های قطری و پله‌ای در دیوارهای بنایی
۴۷	۲-۹-۳- ترک‌خوردگی در پی و دیوار ساختمان‌ها
۴۹	۱۰-۳- ارزیابی مرحله‌ای، تعیین رده خرابی و انتخاب اولیه راهبرد مداخله

۴۹	۳-۱۰-۱- سطح اول ارزیابی: غربالگری سریع
۴۹	۳-۱۰-۲- سطح دوم ارزیابی: ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب
۵۰	۳-۱۰-۳- سطح سوم ارزیابی: ارزیابی تفصیلی تخصصی
۵۱	۳-۱۰-۴- تعیین رده پایه خرابی
۵۳	۳-۱۰-۵- تعیین رده نهایی خرابی
۵۳	۳-۱۰-۶- اثر وضعیت روند تغییرات بر تصمیم‌گیری
۵۴	۳-۱۰-۷- انتخاب اولیه راهبرد مداخله
۵۵	فصل چهار- روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی
۵۶	۴-۱- مقدمه
۵۶	۴-۲- اصول انتخاب راهبرد مداخله
۵۶	۴-۲-۱- رویکرد کلی
۵۷	۴-۲-۲- ترتیب کلی بررسی گزینه‌ها
۵۸	۴-۲-۳- مداخله در شرایط تغییر شکل فعال یا نامشخص
۵۸	۴-۲-۴- مداخله ترکیبی
۵۸	۴-۲-۵- ارزیابی سازگاری و دوام
۵۸	۴-۲-۶- جایگاه تحلیل‌های عددی در انتخاب راهبرد مداخله
۶۰	۴-۳- پایدارسازی موقت و اقدامات احتیاطی
۶۰	۴-۳-۱- موارد قابل بررسی
۶۱	۴-۳-۲- روش‌های پایدارسازی موقت
۶۱	۴-۴- بهسازی زمین و مقاوم‌سازی پی
۶۱	۴-۴-۱- مطالعات و الزامات پیش از مداخله
۶۲	۴-۴-۲- افزایش یکپارچگی و سختی سیستم پی
۶۲	۴-۴-۳- پر کردن حفره‌های زیر پی و ترمیم شکاف‌های زمین
۶۳	۴-۴-۴- بهسازی خاک زیر پی
۶۵	۴-۴-۵- بهسازی پی‌های سطحی
۶۵	۴-۴-۶- انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر
۶۶	۴-۴-۷- بهسازی پی‌های عمیق موجود
۶۶	۴-۴-۸- اتصال پی به سازه فوقانی
۶۷	۴-۴-۹- ترمیم ترک‌ها و حفره‌های پی
۶۷	۴-۵- مقاوم‌سازی اعضای سازه بتنی
۶۷	۴-۵-۱- ترک‌های خمشی در تیرها، دال‌ها و سقف‌ها
۶۸	۴-۵-۲- ترک‌های برشی و قطری در تیرها و ستون‌ها
۶۸	۴-۵-۳- آسیب‌های ستون‌ها و کاهش ظرفیت باربری محوری
۶۹	۴-۵-۴- آسیب اتصال تیر به ستون

۶۹	۴-۵-۵- دیوار برشی بتنی و روکش بتنی
۷۰	۴-۵-۶- کاشت آرماتور
۷۰	۴-۵-۷- ترمیم ترک‌ها
۷۱	۴-۶- مقاومت‌سازی اعضای سازه فولادی
۷۱	۴-۶-۱- اصلاح سیستم باربر و مسیر انتقال نیرو
۷۲	۴-۶-۲- تقویت تیرها و ستون‌ها با ورق‌های تقویتی
۷۲	۴-۶-۳- تقویت اتصالات فولادی
۷۲	۴-۶-۴- استفاده از مهاربندهای ضربدری
۷۳	۴-۶-۵- صفحات فولادی، نبشی‌ها و ورق‌های اتصال
۷۴	۴-۶-۶- استفاده از سخت‌کننده‌ها
۷۴	۴-۶-۷- تبدیل مقطع باز به مقطع جعبه‌ای
۷۴	۴-۶-۸- تقویت ستون‌ها و مهاربندی سازه
۷۵	۴-۶-۹- ارزیابی و ترمیم ترک در اعضا و ورق‌های فولادی
۷۵	۴-۷- مقاومت‌سازی دیوارهای بنایی باربر
۷۶	۴-۸- مقاومت‌سازی اجزای غیر سازه‌ای
۷۶	۴-۸-۱- نماهای شیشه‌ای
۷۷	۴-۸-۲- سقف‌های کاذب، پارتیشن‌ها و اجزای آویزان
۷۷	۴-۸-۳- دیوارهای پرکننده درون قاب
۷۸	۴-۸-۴- تیغه‌ها
۷۸	۴-۸-۵- درب‌ها، چهارچوب‌ها و لولاها
۷۸	۴-۹- شرایط خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری و تصمیم به تخریب
۸۰	۴-۹-۱- فرآیند تصمیم‌گیری و اقدامات نهایی
۸۱	فصل پنج- اجرا و پایش
۸۲	۵-۱- مقدمه
۸۲	۵-۲- اصول کلی
۸۲	۵-۳- برنامه اجرا
۸۳	۵-۳-۱- توالی عملیات
۸۵	۵-۳-۲- کنترل کیفیت و مستندسازی
۸۵	۵-۴- برنامه پایش
۸۵	۵-۴-۱- ابزارهای پایش
۸۶	۵-۴-۲- تناوب قرائت
۸۶	۵-۴-۳- حدود هشدار و اقدام
۸۶	۵-۵- پایش پس از اجرا
۸۷	پیوست (الف)- چک‌لیست‌های مرحله‌ای ارزیابی ساختمان‌ها

۸۹	الف-۱- سطح اول: چکلیست غربالگری سریع
۸۹	الف-۲- سطح دوم: چکلیست ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب
۹۰	الف-۳- سطح سوم: چکلیست ارزیابی تفصیلی تخصصی
۹۰	الف-۳-۱- بخش زمین و محیط پیرامونی
۹۱	الف-۳-۲- بخش پی
۹۲	الف-۳-۳- بخش سازه و اجزای غیر سازه‌ای
۹۳	الف-۴- قاعده تصمیم‌گیری برای توقف یا ادامه ارزیابی
۹۳	الف-۵- فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی
۹۷	پیوست (ب) - مثال ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی ساختمان آسیب‌دیده در پهنه فرونشست
۹۸	ب-۱- مثال اول: ارزیابی و انتخاب راهبرد مداخله برای ساختمان بنایی با رده خرابی متوسط
۹۸	ب-۱-۱- معرفی ساختمان نمونه
۹۸	ب-۱-۲- مشاهدات میدانی
۹۸	ب-۱-۳- داده‌های اندازه‌گیری شده
۹۹	ب-۱-۴- محاسبه شاخص‌های ارزیابی
۹۹	ب-۱-۵- تحلیل نوع آسیب
۱۰۰	ب-۱-۶- تعیین رده خرابی بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری
۱۰۰	ب-۱-۷- راهبرد مقاوم‌سازی پیشنهادی
۱۰۱	ب-۱-۸- جمع‌بندی نتیجه مثال
۱۰۲	ب-۲- مثال دوم: ارزیابی و انتخاب راهبرد مداخله برای سوله صنعتی با دیوارهای بنایی با رده خرابی بسیار شدید
۱۰۲	ب-۲-۱- معرفی ساختمان نمونه
۱۰۲	ب-۲-۲- مشاهدات میدانی
۱۰۳	ب-۲-۳- داده‌های اندازه‌گیری شده
۱۰۳	ب-۲-۴- محاسبه شاخص‌های ارزیابی
۱۰۳	ب-۲-۵- تحلیل نوع آسیب
۱۰۴	ب-۲-۶- تعیین رده خرابی بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری
۱۰۴	ب-۲-۷- اقدامات فوری و اضطراری
۱۰۵	ب-۲-۸- راهبرد مقاوم‌سازی و بهسازی پیشنهادی
۱۰۵	ب-۲-۹- پایش پس از اجرا
۱۰۶	ب-۲-۱۰- توالی اجرای مداخله
۱۰۶	ب-۲-۱۱- جمع‌بندی نتیجه مثال
۱۰۸	مراجع

فهرست جداول

عنوان

صفحه

۱۴	جدول ۱-۲- مقایسه کلی فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی
۳۵	جدول ۱-۳- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری
۵۱	جدول ۲-۳- ماتریس تعیین رده پایه آسیب و انتخاب اولیه راهبرد مداخله
۵۲	جدول ۳-۳- حد نهایی متغیرهای سطوح آسیب
۸۹	جدول الف- ۱- چک‌لیست غربالگری سریع سطح اول
۹۰	جدول الف- ۲- چک‌لیست ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب
۹۱	جدول الف- ۳- چک‌لیست ارزیابی تفصیلی زمین و محیط پیرامونی
۹۲	جدول الف- ۴- چک‌لیست ارزیابی تفصیلی پی و شالوده
۹۲	جدول الف- ۵- چک‌لیست ارزیابی تفصیلی سازه و اجزای غیر سازه‌ای
۹۴	جدول الف- ۶- فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱- فرایند مرحله‌ای شناسایی، ارزیابی، مداخله و پایش ساختمان‌های موجود در پهنه‌های دارای فرونشست
۲۳	شکل ۳-۱- ترک افقی ناشی از خوردگی و قوس برداشتن دیوار
۲۳	شکل ۳-۲- ترک‌های ناشی از حرکت تفاضلی مرتبط با مصالح متفاوت
۲۴	شکل ۳-۳- نمای نزدیک از یک ترک انبساطی با جابه‌جایی افقی ۱ تا ۲ میلی‌متر
۲۷	شکل ۳-۴- انواع نشست از نظر شکل ظاهری
۲۸	شکل ۳-۵- تغییر شکل ساختمان و زمین در اثر فرونشست
۲۹	شکل ۳-۶- ترک خوردگی خاک رس خشک‌شده و جمع شدگی ناشی از کاهش رطوبت
۲۹	شکل ۳-۷- نمایش شماتیک فرونشست و ترک خوردگی ساختمان در اثر کاهش رطوبت خاک رسی در مجاورت درخت
۳۰	شکل ۳-۸- الگوی شماتیک ترک خوردگی ساختمان ناشی از تورم یا بالآمدگی خاک رس
۳۱	شکل ۳-۹- فرونشست موضعی ناشی از نشت زهکش‌ها یا تخلیه آب در مجاورت ساختمان
۳۲	شکل ۳-۱۰- نمونه‌ای از ترک‌های خمشی در سطح زیرین عضو بتنی
۳۳	شکل ۳-۱۱- نمونه‌ای از آسیب برشی در ناحیه اتصال عضو
۳۴	شکل ۳-۱۲- ترک‌های جداسازی بین دیوار و اجزای دیگر
۴۶	شکل ۳-۱۳- الگوی ترک خوردگی ناشی از تغییر شکل مقعر و محدب پی (گودافتادگی و بالآمدگی نسبی)
۴۷	شکل ۳-۱۴- نمونه‌ای از ترک خوردگی در ساختمان‌های آموزشی و صنعتی در اثر فرونشست زمین در منطقه اشتهاارد
۴۸	شکل ۳-۱۵- ترک خوردگی در دیوار بنای جدید ساز و دیوار و پی بنای قدیمی در اثر برداشت آب زیرزمینی در دشت هشتگرد
۵۲	شکل ۳-۱۶- نمودارهای تعیین رده خرابی بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی
۸۴	شکل ۵-۱- فلوچارت توالی عملیات ترمیم و مقاوم‌سازی
۱۰۲	شکل ب-۱- ترک خوردگی در سوله صنعتی ناشی از فرونشست زمین (اشتهاارد)
۱۰۶	شکل ب-۲- توالی عملیات در مثال ب-۲

فصل ۱

کلیات

۱-۱- مقدمه

فرونشست زمین از جمله پدیده‌هایی است که می‌تواند از طریق ایجاد نشست غیریکنواخت، تغییر شکل در زمین و تغییر شرایط تکیه‌گاهی، عملکرد ساختمان‌های موجود را تحت تأثیر قرار دهد. آثار این پدیده ممکن است در اجزای مختلف ساختمان و محوطه پیرامونی ظاهر شود. ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست، از نظر شرایط زمین، نوع پی، سیستم سازه‌ای، میزان آسیب و وضعیت بهره‌برداری دارای شرایط متفاوتی هستند. از این‌رو، ارزیابی و مقاومت‌سازی این ساختمان‌ها مستلزم رویکردی یکپارچه است که در آن منشأ آسیب، وضعیت فعال یا غیرفعال بودن تغییر شکل، شرایط زمین و پی، نوع سیستم سازه‌ای و رده خرابی به‌صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد. در این فصل، ضرورت تدوین راهنما، هدف و دامنه کاربرد آن، ارتباط با سایر ضوابط و منابع، رویکرد حاکم بر فرایند ارزیابی و مقاومت‌سازی و اصطلاحات مورد استفاده در فصل‌های بعد بیان می‌شود.

۱-۲- ضرورت تدوین راهنما

قرارگیری ساختمان‌های موجود در پهنه‌های دارای فرونشست زمین می‌تواند موجب آسیب در پی، اعضای سازه‌ای، اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات ساختمان شود. شدت و نحوه بروز این آسیب‌ها به عواملی مانند شرایط زمین، وضعیت پی، نوع سیستم سازه‌ای، کیفیت ساخت، میزان و روند تغییر شکل و شرایط بهره‌برداری ساختمان وابسته است. ضوابط و منابع موجود در زمینه طراحی و ساخت ساختمان‌های جدید، بهسازی لرزه‌ای، ترمیم سازه و بهسازی خاک، هر یک بخشی از ملاحظات مورد نیاز را پوشش می‌دهند؛ با این حال، استفاده مستقیم از آن‌ها برای ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست، نیازمند توجه هم‌زمان به منشأ آسیب، فعال یا غیرفعال بودن تغییر شکل، وضعیت زمین و پی و روند تغییرات ساختمان در طول زمان است. از این‌رو، تدوین یک فرایند منسجم برای شناسایی، ارزیابی، تعیین سطح آسیب، انتخاب راهبرد مداخله، اجرای عملیات و پایش ساختمان ضرورت دارد. این راهنما با هدف ایجاد ارتباط میان مراحل یادشده و فراهم کردن مبنایی مشترک برای تصمیم‌گیری فنی در خصوص ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست تدوین شده است.

۱-۳- هدف

هدف این راهنما، ارائه اصول، ملاحظات و چارچوب فنی و اجرایی برای شناسایی، ارزیابی، بهسازی و مقاومت‌سازی ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست زمین است. به‌کارگیری این چارچوب با هدف کاهش آسیب‌پذیری سازه‌ای و غیر سازه‌ای، ارتقای ایمنی جانی کاربران و بهره‌برداران و کمک به کاهش خسارات ناشی از تغییر شکل‌های تحمیلی زمین انجام می‌شود.

۱-۴ - دامنه کاربرد

این راهنما در موارد زیر کاربرد دارد:

(الف) ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست که نیازمند ارزیابی ایمنی، ترمیم، بهسازی یا مقاوم‌سازی هستند؛

(ب) طرح‌ها و عملیات مربوط به بهسازی بستر، مقاوم‌سازی پی، سازه فوقانی یا اجزای غیر سازه‌ای ساختمان‌های موجود واقع در این پهنه‌ها.

تمرکز اصلی این راهنما بر ارزیابی و بهسازی ساختمان‌های موجود است؛ با این حال، اصول و ملاحظات آن می‌تواند حسب شرایط پروژه، در بررسی ساختمان‌های جدید نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۵ - ارتباط با سایر ضوابط و نشریات داخلی

در تدوین این راهنما، علاوه بر ضوابط و منابع مرتبط با فرونشست، از نشریات و راهنماهای داخلی موجود در زمینه ارزیابی، بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود نیز در بخش‌های مرتبط استفاده شده است. از جمله این منابع می‌توان به نشریه شماره ۳۶۰ با عنوان دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و نشریه شماره ۵۲۴ با عنوان راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی، منتشرشده در چارچوب نظام فنی و اجرایی توسط سازمان برنامه و بودجه کشور اشاره کرد.

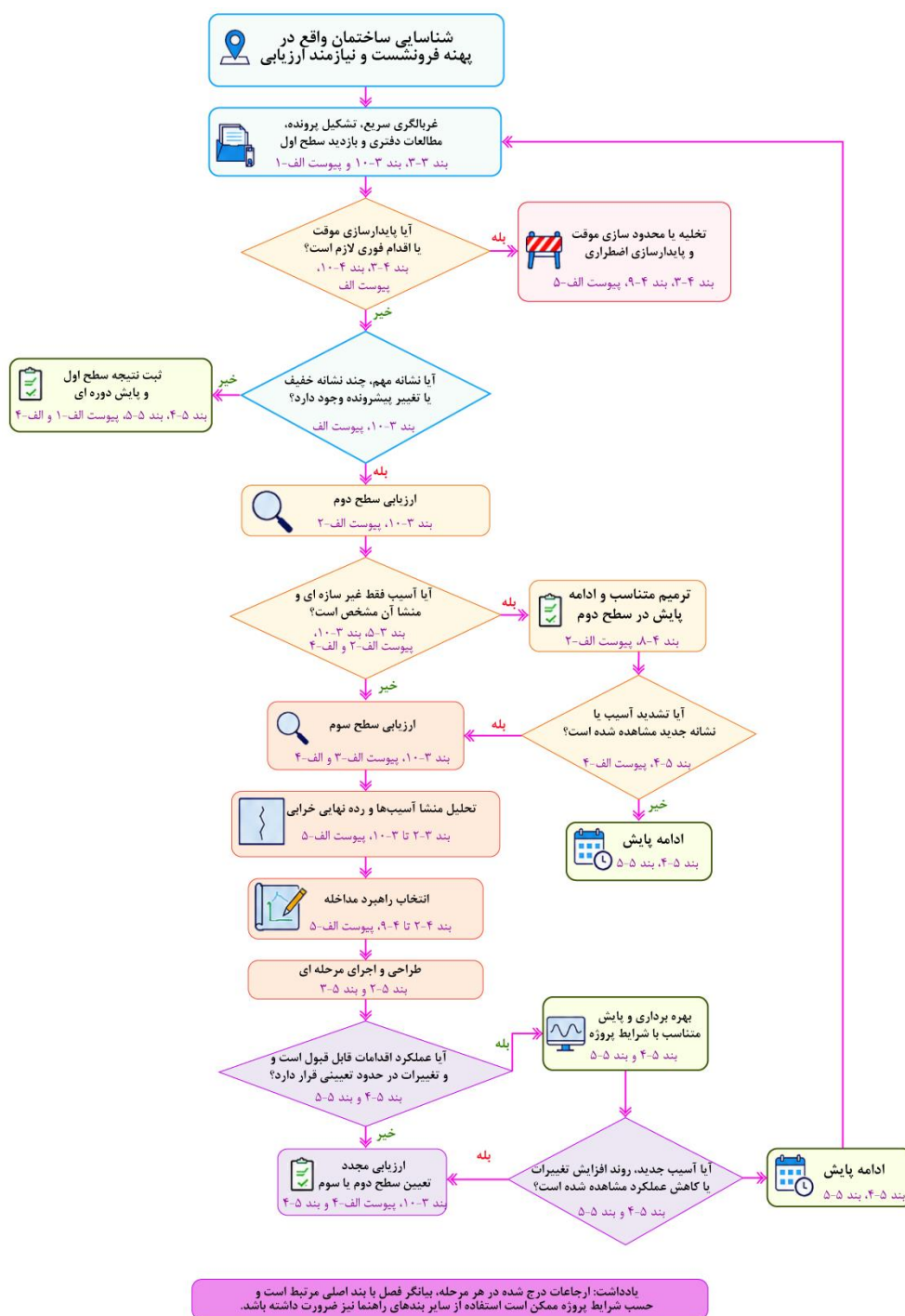
این نشریات عمده‌تاً برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود تدوین شده‌اند و مستقیماً ناظر بر مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در پهنه‌های دارای فرونشست نیستند؛ از این رو، مطالب مرتبط آن‌ها در این راهنما به عنوان منابع مکمل مورد استفاده قرار گرفته است.

۱-۶ - رویکرد حاکم

رویکرد این راهنما بر فرایندی گام‌به‌گام، پیوسته و دارای سازوکار بازخورد، از شناسایی تا مدیریت بهره‌برداری و نگهداری استوار است. این فرایند با مطالعات دفتری آغاز می‌شود و با بازدید صحرایی و برداشت میدانی ادامه می‌یابد.

اطلاعات حاصل در قالب گزارش ارزیابی اولیه مستند می‌شود و سپس تحلیل آسیب‌ها بر مبنای داده‌ها و نتایج ارزیابی انجام می‌گیرد. بر پایه این تحلیل، طرح مقاوم‌سازی و بهسازی تدوین و عملیات اجرا و پایش آغاز می‌شود.

در نهایت، مدیریت دوره بهره‌برداری به تداوم اقدامات و ارزیابی اثربخشی آن‌ها کمک می‌کند و بازخورد حاصل از آن، در صورت نیاز، به مراحل پیشین بازمی‌گردد. در شکل (۱-۱)، نمای کلی فرایند مرحله‌ای این راهنما، شامل مسیرهای تصمیم‌گیری و شاخه‌های مختلف اقدام، از شناسایی تا مدیریت بهره‌برداری، ارائه شده است.



شکل ۱-۱- فرایند مرحله‌ای شناسایی، ارزیابی، مداخله و پایش ساختمان‌های موجود در پهنه‌های دارای فرونشست

۷-۱- ساختار راهنما

این راهنما در پنج فصل و دو پیوست تدوین شده است. ساختار فصل‌ها و پیوست‌های راهنما به شرح زیر است:

- فصل اول - کلیات: در این فصل، ضرورت تدوین، هدف، دامنه کاربرد، ارتباط با سایر ضوابط و منابع، رویکرد حاکم بر راهنما و اصطلاحات اصلی مورد استفاده بیان می‌شود.

- فصل دوم - مبانی فرونشست و اثر آن بر ساختمان‌ها: در این فصل، سازوکارهای اصلی فرونشست زمین، پیامدهای آن و نحوه اثرگذاری نشست یکنواخت، نشست غیریکنواخت و تغییر شکل زمین بر ساختمان‌ها بررسی می‌شود. همچنین، ملاحظات مربوط به تفکیک فرونشست منطقه‌ای از نشست موضعی ارائه می‌گردد.
- فصل سوم - تحلیل آسیب‌ها: این فصل به شناسایی و تحلیل آسیب‌های ساختمان، منشأ یابی ترک‌ها، تشخیص فعال یا غیرفعال بودن آسیب، بررسی مودهای خرابی در سیستم‌های سازه‌ای مختلف و تعیین سطح خرابی اختصاص دارد. در پایان این فصل، چارچوب اولیه انتخاب راهبرد مداخله بر اساس نتایج ارزیابی ارائه می‌شود.
- فصل چهارم - روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی: در این فصل، اصول انتخاب روش مداخله و راهکارهای پایدارسازی موقت، بهسازی بستر و پی، مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای و اجزای غیر سازه‌ای و ملاحظات مربوط به خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری بررسی می‌شود.
- فصل پنجم - اجرا و پایش: این فصل به اصول برنامه‌ریزی و اجرای مرحله‌ای عملیات مقاوم‌سازی، کنترل کیفیت، مستندسازی، پایش حین اجرا و پایش پس از اجرا اختصاص دارد.
- پیوست الف - چک‌لیست‌های مرحله‌ای ارزیابی: در این پیوست، چک‌لیست‌های غربالگری سریع، ارزیابی نیمه تفصیلی، ارزیابی تخصصی زمین، پی و سازه و فرم جمع‌بندی نهایی ارائه شده است.
- پیوست ب - مثال حل‌شده ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی: در این پیوست، نحوه استفاده از چک‌لیست‌ها، تعیین سطح خرابی و انتخاب راهبرد مداخله برای یک ساختمان نمونه تشریح شده است.

۱-۸- تعاریف

در این راهنما، اصطلاحات زیر در معانی مشروح مربوط به کار می‌روند:

۱-۸-۱- فرونشست زمین

کاهش تراز سطح زمین در اثر تغییر شکل و کاهش حجم لایه‌های زیرسطحی.

۱-۸-۲- نشست تفاضلی

اختلاف مقدار نشست بین دو نقطه، دو بخش از یک ساختمان، دو پی یا دو عضو سازه‌ای.

۱-۸-۳- نرخ نشست یا نرخ تغییر شکل

مقدار نشست یا تغییر شکل در واحد زمان. این شاخص برای تشخیص فعال بودن یا توقف روند فرونشست اهمیت دارد.

۱-۸-۴- گرادیان نشست

مقدار تغییر نشست نسبت به فاصله مکانی بین دو نقطه است.

۱-۸-۵- تغییر شکل ساختمان

تغییر در شکل یا موقعیت پی، زیر سازه، سازه فوقانی، اجزای غیر سازه‌ای یا محوطه ساختمان در اثر بارگذاری، نشست، فرونشست، تغییر شرایط زمین یا سایر عوامل مؤثر.

۱-۸-۶- تزریق

روش بهسازی زمین یا ترمیم که در آن ماده تزریقی مناسب به داخل خاک، حفره‌ها یا ترک‌ها وارد می‌شود تا حسب مورد، مقاومت افزایش یابد، تغییر شکل کاهش پیدا کند، فضای خالی پر شود یا نفوذپذیری کنترل گردد.

۱-۸-۷- ریز شمع

شمع با قطر نسبتاً کم که برای انتقال بار، تقویت پی، بهسازی موضعی بستر یا افزایش ظرفیت باربری در زیر یا پیرامون ساختمان اجرا می‌شود.

۱-۸-۸- پایش

فرایند مشاهده، اندازه‌گیری، ثبت و تحلیل دوره‌ای یا مستمر نشست، کجی، ترک، تغییر شکل، سطح آب زیرزمینی یا سایر شاخص‌های مؤثر بر ایمنی و بهره‌برداری ساختمان.

۱-۸-۹- نقطه مبنا

نقطه نقشه‌برداری با پایداری نسبی مناسب که تا حد امکان، خارج از محدوده تأثیر تغییر شکل‌های مورد بررسی انتخاب شده و به‌عنوان مرجع اندازه‌گیری استفاده می‌شود.

۱-۸-۱۰- مقاومت‌سازی

مجموعه اقدامات فنی برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش ایمنی، پایداری، ظرفیت باربری یا قابلیت بهره‌برداری ساختمان، پی، زیر سازه یا زمین زیر پی در برابر آثار فرونشست.

۱-۸-۱۱- تغییر شکل فعال

تغییر شکل فعال به تغییر شکل زمین، پی یا ساختمان گفته می‌شود که در یک دوره پایش مشخص، با در نظر گرفتن تناوب قرائت و دقت ابزار اندازه‌گیری، به‌صورت تغییر قابل‌اندازه‌گیری در یک یا چند شاخص ثبت شده باشد. به عبارت دیگر، در تغییر شکل فعال، روند تغییرات در طول دوره پایش ادامه‌دار بوده و تثبیت یا کاهش محسوسی در آن مشاهده نشده است.

۱-۸-۱۲- کجی پیش‌رونده

افزایش تدریجی انحراف ساختمان، دیوار، ستون یا سایر اجزا از راستای قائم یا وضعیت مبنا که بر اساس اندازه‌گیری‌های متوالی در طول زمان قابل تشخیص باشد.

۱-۸-۱۳- اقدام اضطراری

اقدام فوری برای کاهش خطر در شرایط وجود تغییر شکل فعال، کجی پیش‌رونده، نشست شدید، ناپایداری، آسیب جدی یا تهدید ایمنی کاربران.

فصل ۲

مبانی فرونشست و اثر آن بر

ساختمان‌ها

۲-۱- مقدمه

فرونشست زمین می‌تواند از طریق ایجاد نشست تفاضلی و بروز تغییر شکل‌های قائم و افقی، عملکرد زمین، پی، سازه و تأسیسات ساختمان را تحت تأثیر قرار دهد. نوع و شدت آثار ایجاد شده به عواملی مانند سازوکار فرونشست، ویژگی‌های لایه‌های زیرسطحی، میزان و روند تغییر شکل زمین، نوع پی، سیستم سازه‌ای و شرایط بهره‌برداری ساختمان وابسته است. در این فصل، ابتدا سازوکارهای اصلی فرونشست زمین و پیامدهای سطحی، هیدروژئولوژیکی و سازه‌ای آن معرفی می‌شود. سپس اثرات نشست منطقه‌ای و موضعی بر ساختمان‌ها و ملاحظات لازم برای تفکیک اولیه این دو پدیده مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالب این فصل مبنای تحلیل آسیب‌ها و انتخاب راهبردهای مداخله در فصل‌های بعد است.

۲-۲- سازوکارهای فرونشست زمین

در بسیاری از دشت‌های تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست زمین در نتیجه تراکم و تحکیم رسوبات سیستم آبخوان رخ می‌دهد. کاهش فشار آب منفذی می‌تواند موجب افزایش تنش مؤثر در اسکلت خاک شود. این افزایش تنش، به ویژه در لایه‌های ریزدانه، اشباع و تراکم پذیر، ممکن است به خروج تدریجی آب از منافذ، کاهش حجم رسوبات و افت تراز سطح زمین منجر شود. عوامل دیگری مانند برداشت سایر سیالات زیرزمینی، انحلال مواد، وجود حفره‌های زیرسطحی، فعالیت‌های معدنی یا برخی فرایندهای زمین‌شناختی نیز ممکن است در ایجاد یا تشدید فرونشست نقش داشته باشند.

فرونشست زمین، علاوه بر تأثیر بر بستر، پی و ساختمان، می‌تواند پیامدهایی در محیط زمین‌شناختی، هیدروژئولوژیکی و تأسیسات پیرامونی ایجاد کند که در ارزیابی وضعیت ساختمان باید مورد توجه قرار گیرند.

۲-۲-۱- پیامدهای سطحی و ژئومورفولوژیکی

پیامدهای سطحی فرونشست، حسب ویژگی‌های زمین و شدت و الگوی تغییر شکل، می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- ایجاد یا گسترش شکاف‌های کششی در سطح زمین؛
- تغییر شیب سطح زمین و اختلال در زهکشی سطحی؛
- افزایش احتمال آب‌گرفتگی در محوطه ساختمان‌ها و تأسیسات پیرامونی؛
- کاهش تراز زمین و کاهش کارایی برخی تأسیسات حفاظتی مانند سیل بندها و دیوارهای حائل؛
- ایجاد یا گسترش فروریزش‌ها و حفره‌های موضعی، در صورت وجود شرایط زمین‌شناختی مناسب؛
- بروز یا تشدید فرسایش داخلی و انتقال ذرات ریز خاک در صورت وجود جریان آب زیرسطحی؛
- لوله زایی، ایجاد اختلال در عملکرد چاه‌ها و سایر تأسیسات مرتبط با منابع آب زیرزمینی و آسیب به جدار یا لوله‌های چاه از جمله گسیختگی یا برش افقی آن‌ها، در اثر جابه‌جایی و تغییر شکل افقی زمین. این نوع آسیب

می‌تواند تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی، تغییر شکل غیریکنواخت رسوبات و ناهمگنی یا شیب لایه‌های آبخوان ایجاد شود.

وجود هر یک از این نشانه‌ها به تنهایی برای انتساب آسیب ساختمان به فرونشست کافی نیست و باید همراه با سایر شواهد زمین‌شناختی، ژئوتکنیکی و سازه‌ای بررسی شود.

۲-۲-۲- پیامدهای هیدروژئولوژیکی

یکی از پیامدهای مهم تراکم رسوبات سیستم آبخوان، کاهش تخلخل مؤثر و ظرفیت ذخیره‌سازی آن است. در برخی لایه‌های ریزدانه، بخشی از تغییر شکل ایجاد شده می‌تواند برگشت‌ناپذیر باشد و موجب کاهش پایدار ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان شود. این بخش از تغییر شکل باید به عنوان خسارت غیر قابل جبران به منابع آب در نظر گرفته شود. در رسوبات ریزدانه و کم نفوذ، ممکن است میان افت سطح آب زیرزمینی و بروز تغییر شکل در سطح زمین تأخیر زمانی وجود داشته باشد. از این رو، فرایند تحکیم می‌تواند پس از کاهش یا توقف برداشت نیز برای مدتی ادامه یابد. روند و نرخ این تغییر شکل به شرایط آبخوان، ویژگی‌های لایه‌های زیرسطحی و تغییرات سطح آب زیرزمینی وابسته است.

۲-۲-۳- پیامدهای سازه‌ای و آسیب به شریان‌های حیاتی

فرونشست زمین، به ویژه در صورت ایجاد نشست غیریکنواخت در محدوده ساختمان، می‌تواند بر عملکرد پی، اعضای سازه‌ای، اجزای غیر سازه‌ای، تأسیسات و شریان‌های حیاتی اثر بگذارد. برخی از پیامدهای محتمل عبارت‌اند از:

- ترک خوردگی در پی، دیوارها و اعضای سازه‌ای: نشست غیریکنواخت می‌تواند موجب ایجاد نیروها و تنش‌های اضافی در اعضای ساختمان و ایجاد یا گسترش ترک‌های قائم، افقی، مورب یا پلکانی شود. این ترک‌ها ممکن است در اطراف بازشوها، محل اتصال اعضا، نواحی تغییر سختی و بخش‌های نزدیک به پی بیشتر مشاهده شوند.
- اعوجاج و انحراف اجزای ساختمان: تغییر شکل‌های تفاضلی می‌توانند به ناترازی تیرها، ستون‌ها، دیوارها، دال‌ها و کف‌ها منجر شوند و عملکرد بهره‌برداری ساختمان را تحت تأثیر قرار دهند.
- آسیب به تأسیسات و خطوط مدفون: جابه‌جایی زمین ممکن است باعث تغییر شیب، بازشدگی اتصالات، شکستگی لوله‌های آب، فاضلاب و گاز یا آسیب به کابل‌های برق و مخابرات شود.
- آسیب به شریان‌های حیاتی: تغییر شکل‌های قائم و افقی زمین ممکن است موجب ایجاد ناترازی، ترک خوردگی، تغییر شکل بستر، گسیختگی موضعی یا اختلال در عملکرد و بهره‌برداری راه‌ها، خطوط راه‌آهن، دکل‌ها و خطوط انتقال برق و سایر زیرساخت‌های مشابه شود.
- اختلال در عملکرد درها و پنجره‌ها: تغییر شکل قاب‌ها، دیوارها یا کف ساختمان می‌تواند موجب گیرکردن درها و پنجره‌ها، تغییر شکل چهارچوب‌ها یا اختلال در باز و بسته شدن آن‌ها شود.

- آثار تغییر شکل افقی زمین: تغییر شکل افقی زمین می‌تواند به صورت جابه‌جایی افقی یا کرنش کششی و فشاری ظاهر شود. در صورت انتقال این تغییر شکل‌ها به پی، اجزای ساختمان یا تأسیسات مدفون، امکان ایجاد ترک‌خوردگی، بازشدگی یا فشردگی درزها، گسیختگی موضعی و اختلال در عملکرد تأسیسات وجود دارد. نشانه‌های یادشده ممکن است در اثر عوامل دیگری مانند ضعف اجرا، تغییرات دما، نشست آب، گودبرداری مجاور یا تغییر بارگذاری نیز ایجاد شوند؛ بنابراین، منشأ آسیب نباید صرفاً بر اساس شکل ظاهری آن تعیین شود.

۲-۳- ارزیابی اثرات فرونشست بر ساختمان‌ها

از نظر گستره وقوع و عوامل ایجادکننده، می‌توان میان فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی تمایز قائل شد. فرونشست منطقه‌ای پدیده‌ای پهنه‌ای است که ممکن است بخشی از یک شهر، دشت یا سیستم آبخوان را تحت تأثیر قرار دهد، در حالی که نشست موضعی معمولاً به یک ساختمان، بخشی از آن یا محدوده پیرامونی ساختمان محدود می‌شود. از نظر نحوه توزیع تغییر شکل در محدوده یک ساختمان، هر یک از فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی می‌تواند به صورت نسبتاً یکنواخت یا غیریکنواخت ظاهر شود. در نشست یکنواخت، بخش‌های مختلف ساختمان تغییر تراز تقریباً مشابهی را تجربه می‌کنند، در حالی که در نشست غیریکنواخت، مقدار یا نرخ نشست در بخش‌های مختلف زمین، پی یا ساختمان متفاوت است. نشست غیریکنواخت ممکن است با شیب، انحنا، دوران نسبی و تغییر شکل‌های افقی زمین همراه باشد.

بنابراین، منطقه‌ای یا موضعی بودن پدیده به گستره و منشأ آن مربوط است، در حالی که یکنواخت یا غیریکنواخت بودن نشست، نحوه توزیع تغییر شکل در محدوده ساختمان را بیان می‌کند. در ارزیابی هر ساختمان، اطلاعات مربوط به هر دو جنبه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. داده‌های منطقه‌ای وضعیت کلی پهنه را نشان می‌دهند، اما تعیین نوع و شدت آسیب ساختمان به بررسی‌های محلی زمین، پی و سازه نیاز دارد.

۲-۳-۱- الگوی یکنواخت نشست

در شرایطی که مقدار و نرخ نشست در محدوده زیر یک ساختمان، چه در ارتباط با فرونشست منطقه‌ای و چه در اثر عوامل موضعی، تقریباً یکنواخت باشد و اختلاف نشست قابل توجهی میان تکیه‌گاه‌ها ایجاد نشود، ساختمان ممکن است به صورت نسبتاً یکپارچه دچار تغییر تراز شود. در چنین حالتی، نشست کلی الزاماً موجب آسیب جدی در سازه نمی‌شود؛ با این حال، ممکن است عملکرد تأسیسات، دسترسی‌ها، شیب بندی محوطه، خطوط مدفون و ارتباط ساختمان با محیط پیرامونی تحت تأثیر قرار گیرد.

به دلیل ناهمگنی لایه‌های زیرسطحی، تفاوت ضخامت رسوبات، تغییرات سطح آب زیرزمینی و تفاوت شرایط پی، ممکن است در مقیاس یک ساختمان نیز اختلاف‌هایی در مقدار یا نرخ نشست ایجاد شود؛ بنابراین، یکنواخت بودن کامل نشست نباید بدون بررسی و اندازه‌گیری به عنوان فرض مبنا پذیرفته شود.

۲-۳-۲- الگوی غیریکنواخت نشست

نشست غیریکنواخت می‌تواند در اثر تغییرات مکانی فرونشست منطقه‌ای یا عوامل ایجادکننده نشست موضعی رخ دهد. این وضعیت زمانی ایجاد می‌شود که بخش‌های مختلف زمین، پی یا ساختمان، مقادیر یا نرخ‌های متفاوتی از نشست را تجربه کنند و در نتیجه، تغییر شکل‌های نسبی در ساختمان ایجاد شود. عوامل مؤثر بر ایجاد نشست غیریکنواخت و تغییر شکل‌های افقی می‌توانند شامل ناهمگنی زمین، تغییرات مکانی در حوضه فرونشست و عوامل موضعی مؤثر بر شرایط زمین و پی باشند.

الف) ناهمگنی ذاتی زمین: ضخامت، جنس، تراکم‌پذیری و گستردگی لایه‌های رسی، ماسه‌ای و درشت‌دانه در زیر ساختمان‌ها و مناطق شهری یکنواخت نیست؛ بنابراین، حتی در صورت افت سطح آب زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای، پاسخ تحکیمی زمین ممکن است در نقاط مختلف متفاوت باشد و این تفاوت به ایجاد نشست تفاضلی، شیب یا انحنای سطح زمین منجر شود.

ب) تغییرات مکانی در حوضه فرونشست: در حاشیه و دامنه حوضه‌های فرونشست، تغییرات مکانی مقدار نشست می‌تواند موجب ایجاد شیب، انحنای و جابه‌جایی افقی در سطح زمین شود. در این نواحی، نقاط واقع بر سطح زمین ممکن است به‌طور هم‌زمان جابه‌جایی قائم و افقی را تجربه کنند.

تغییر فاصله میان نقاط سطح زمین می‌تواند به ایجاد کرنش افقی کششی یا فشاری منجر شود. افزایش فاصله میان دو نقطه با کرنش کششی و کاهش فاصله میان آن‌ها با کرنش فشاری همراه است.

پ) عوامل موضعی: نشست آب یا فاضلاب، تراکم ناکافی خاک زیر پی، گودبرداری یا حفاری مجاور، بارگذاری نامتقارن و تغییر شرایط بهره‌برداری می‌توانند موجب ایجاد یا تشدید نشست غیریکنواخت در محدوده ساختمان شوند.

۲-۳-۳- تفکیک فرونشست منطقه‌ای از نشست موضعی

فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی از نظر گستره وقوع و عوامل ایجادکننده با یکدیگر تفاوت دارند، اما هر دو می‌توانند در محدوده یک ساختمان به‌صورت نشست یکنواخت یا غیریکنواخت ظاهر شوند. تفکیک اولیه این دو پدیده برای تحلیل منشأ آسیب و انتخاب روش مناسب ارزیابی و مداخله اهمیت دارد.

ترک‌خوردگی یک دیوار، نشست کف یا کج شدن بخشی از ساختمان ممکن است در اثر عوامل موضعی مانند تراکم ناکافی خاک زیر پی، نشست آب، گودبرداری مجاور یا ضعف شالوده ایجاد شده باشد. همین نشانه‌ها ممکن است در یک پهنه دارای فرونشست منطقه‌ای نیز مشاهده شوند؛ بنابراین، هیچ‌یک از این نشانه‌ها به‌تنهایی برای تعیین منشأ آسیب کافی نیست.

الف) نشست موضعی: نشست موضعی معمولاً در محدوده یک ساختمان، بخشی از ساختمان یا محوطه پیرامونی آن رخ می‌دهد. عوامل محتمل ایجاد آن می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- تراکم ناکافی یا ناهمگن خاک زیر پی؛

- طراحی یا اجرای نامناسب شالوده؛
- گودبرداری، حفاری یا اجرای تأسیسات در مجاورت ساختمان؛
- نشست آب یا فاضلاب در زیر یا اطراف پی؛
- بارگذاری نامتقارن یا افزایش بار ساختمان؛
- تغییر کاربری یا شرایط بهره‌برداری.

در صورت احتمال ارتباط آسیب با عوامل موضعی، لازم است منشأ آن بر اساس بررسی وضعیت زمین، پی، سوابق طراحی و اجراء، شرایط بهره‌برداری و شواهد موجود تعیین شود.

ب) فرونشست منطقه‌ای: فرونشست منطقه‌ای پدیده‌ای پهنه‌ای است که ممکن است در مقیاس بخشی از یک دشت، شهر یا سیستم آبخوان رخ دهد. در بسیاری از موارد، افت سطح آب زیرزمینی و تراکم رسوبات از عوامل اصلی آن هستند. تشخیص احتمال وجود فرونشست منطقه‌ای می‌تواند بر اساس مجموعه‌ای از اطلاعات زیر انجام شود:

- داده‌های ترازیابی و نقشه‌برداری؛
- داده‌های سنجش از دور و تداخل‌سنجی راداری؛
- نقشه‌های پهنه‌بندی فرونشست؛
- اطلاعات تغییرات سطح آب زیرزمینی؛
- مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی.

وجود فرونشست منطقه‌ای به‌تنهایی اثبات نمی‌کند که تمام آسیب‌های یک ساختمان ناشی از آن است. برای هر ساختمان، لازم است ارتباط میان داده‌های پهنه‌ای و شواهد موضعی زمین، پی و سازه بررسی شود.

۲-۳-۱- فرایند تشخیص

تشخیص اولیه منشأ احتمالی آسیب باید بر اساس مجموعه‌ای از شواهد انجام شود و نباید تنها به مشاهده ترک یا یک شاخص منفرد متکی باشد. این ارزیابی می‌تواند شامل بررسی موارد زیر باشد:

- الگوی ترک‌ها و تغییر شکل‌های ساختمان؛
- مقدار و روند نشست و کج شدگی؛
- وضعیت پی و خاک زیر آن؛
- وجود نشست آب یا تغییر شرایط رطوبتی؛
- سوابق گودبرداری، حفاری، بارگذاری یا تغییر کاربری؛
- وضعیت ساختمان‌ها و تأسیسات پیرامونی؛
- داده‌های پایش منطقه‌ای و محلی؛
- اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی.

ارزیابی فنی می‌تواند توسط گروهی متناسب با شرایط پروژه و با مشارکت تخصص‌های سازه، ژئوتکنیک، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری یا سایر تخصص‌های مرتبط انجام شود.

در مواردی که نتیجه تشخیص مبنای تعیین مسئولیت حقوقی، جبران خسارت یا تصمیم حاکمیتی قرار گیرد، بررسی موضوع تابع قوانین، قراردادهای و نظر مراجع ذیصلاح خواهد بود و از دامنه تصمیم‌گیری صرفاً فنی این راهنما خارج است.

مشخصات کلی فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

جدول ۱-۲- مقایسه کلی فرونشست منطقه‌ای و نشست موضعی

ویژگی	فرونشست منطقه‌ای	نشست موضعی
گستره وقوع	پهنه‌ای و مرتبط با بخشی از شهر، دشت یا سیستم آبخوان (کیلومتر تا ده‌ها کیلومتر)	محدود به ساختمان، محوطه یا محدوده محلی پیرامون آن (متر تا صدها متر)
عوامل محتمل	افت سطح آب زیرزمینی، تراکم رسوبات و عوامل زمین‌شناختی ناحیه‌ای	ضعف خاک یا پی، نشست آب، گودبرداری، بارگذاری و عوامل اجرایی یا بهره‌برداری
الگوی تغییر شکل	گسترده و معمولاً تدریجی، همراه با تغییرات مکانی نرخ نشست	محدود و وابسته به شرایط محلی، با روند زمانی متغیر
تغییر شکل نسبی	امکان ایجاد نشست تفاضلی، شیب و کرنش افقی کششی یا فشاری	نشست تفاضلی و تغییر شکل موضعی زمین، پی یا ساختمان
شواهد و ابزارهای بررسی	ترازیابی، داده‌های سنجش از دور، نقشه‌های پهنه‌بندی، اطلاعات آب زیرزمینی و مطالعات منطقه‌ای	مطالعات ژئوتکنیکی محلی، بررسی پی، سوابق اجرا، کنترل تأسیسات و شواهد بهره‌برداری
مبنای نتیجه‌گیری	تطبیق داده‌های پهنه‌ای با شواهد محلی ساختمان	بررسی ارتباط شواهد موضعی با شرایط زمین، پی، اجرا و بهره‌برداری

فصل ۳

تحليل آسیب‌ها

۳-۱- مقدمه

آسیب‌های مشاهده شده در ساختمان‌های واقع در پهنه‌های دارای فرونشست ممکن است محصول اثر هم‌زمان تغییر شکل زمین، وضعیت پی، ویژگی‌های سیستم سازه‌ای، کیفیت ساخت، شرایط بهره‌برداری و عوامل موضعی پیرامون ساختمان باشند. از این‌رو، مشاهده ترک، اختلاف تراز، کج شدگی یا اختلال در عملکرد اجزای ساختمان، به‌تنهایی برای انتساب آسیب به فرونشست منطقه‌ای یا تعیین روش مداخله کافی نیست.

تحلیل آسیب با هدف شناسایی نوع و گستره آسیب، بررسی عوامل محتمل ایجاد آن، تعیین وضعیت روند تغییرات و ارزیابی مقدماتی آثار آن بر ایمنی و بهره‌برداری ساختمان انجام می‌شود. در این تحلیل، مناسب است شواهد مربوط به زمین، پی، سازه، اجزای غیر سازه‌ای، تأسیسات و محیط پیرامونی به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گیرند.

در این فصل، اصول تحلیل آسیب، سازوکارهای محتمل خرابی، الگوهای آسیب در سیستم‌های سازه‌ای مختلف، تشخیص روند تغییرات و چارچوب تعیین مقدماتی سطح آسیب ارائه می‌شود. نتایج این فصل می‌تواند مبنای ارجاع ساختمان به مطالعات تکمیلی و انتخاب راهبرد مداخله مطابق فصل چهارم قرار گیرد.

۳-۲- اصول کلی تحلیل آسیب

تحلیل آسیب باید بر پایه مجموعه‌ای از شواهد و با در نظر گرفتن ارتباط میان زمین، پی و ساختمان انجام شود. در این فرایند، توجه به اصول زیر توصیه می‌شود:

الف) مشخصات آسیب، از جمله نوع، محل، امتداد، طول، پهنای، عمق و نحوه توزیع ترک‌ها و تغییر شکل‌ها برداشت و ثبت شود؛

ب) شواهد مربوط به وضعیت زمین، پی، اعضای سازه‌ای، اجزای غیر سازه‌ای، تأسیسات و محیط پیرامونی به‌صورت یکپارچه بررسی شوند؛

پ) برای هر آسیب، عوامل محتمل ایجاد آن، از جمله فرونشست منطقه‌ای، نشست موضعی، نشت آب، گودبرداری مجاور، تغییر بارگذاری، ضعف اجرا و تغییرات حرارتی یا حجمی مصالح، شناسایی و با شواهد موجود مقایسه شوند؛

ت) در تعیین منشأ محتمل آسیب، علاوه بر ظاهر و محل ترک، نوع مصالح، عمق ترک، وجود جابه‌جایی نسبی، وضعیت اتصالات، تغییرات تراز و الگوی کلی آسیب نیز مورد توجه قرار گیرد؛

ث) الگوی آسیب، حسب مورد، با مشخصات سیستم سازه‌ای، نوع و وضعیت پی، شرایط زمین، وضعیت ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور و داده‌های نقشه‌برداری یا پایش تطبیق داده شود؛

ج) روند تغییرات زمین، پی، ساختمان و ترک‌ها بر اساس سوابق موجود، مشاهدات میدانی، گزارش بهره‌برداران و در صورت نیاز، نتایج پایش دوره‌ای ارزیابی شود؛

چ) انتخاب روش ترمیم، مقاوم‌سازی یا سایر اقدامات مداخله‌ای پس از شناسایی عامل یا عوامل محتمل ایجاد آسیب و بررسی میزان نقش آن‌ها انجام شود. مداخله پیش از انجام این بررسی ممکن است اثربخشی محدودی داشته باشد یا موجب پوشیده شدن نشانه‌های قابل پایش شود؛

ح) نتایج تحلیل بر پایه شواهد موجود ارائه شود و در مواردی که اطلاعات برای نتیجه‌گیری قطعی کافی نیست، عوامل محتمل، فرضیات، عدم قطعیت‌ها و سطح اطمینان نتیجه بیان شوند.

تحلیل آسیب می‌تواند توسط گروهی متناسب با شرایط پروژه و با مشارکت تخصص‌های سازه، ژئوتکنیک، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری، معماری و تأسیسات انجام شود. ترکیب گروه ارزیابی می‌تواند با توجه به اهمیت ساختمان، نوع و گستره آسیب، میزان تغییر شکل و سطح خطر تعیین شود.

۳-۳- اطلاعات و شواهد مورد نیاز

۳-۳-۱- مطالعات دفتری

پیش از بازدید میدانی، گردآوری اطلاعات موجود می‌تواند به شناخت سابقه ساختمان و کاهش عدم قطعیت در تحلیل کمک کند. این اطلاعات، حسب مورد، می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- نقشه‌های معماری، سازه و شالوده؛
- گزارش‌های ژئوتکنیکی و اطلاعات گمانه‌ها؛
- مشخصات سیستم سازه‌ای و نوع پی؛
- تاریخ ساخت و سوابق تعمیر، توسعه یا تغییر کاربری؛
- سوابق نشت آب، شکست تأسیسات یا آب‌گرفتگی؛
- اطلاعات مربوط به گودبرداری، حفاری یا ساخت و سازهای مجاور؛
- گزارش‌های قبلی ترک، نشست یا کج شدگی؛
- نقشه‌ها و داده‌های پهنه‌بندی فرونشست؛
- اطلاعات ترازیابی، نقشه‌برداری یا سنجش از دور؛
- سوابق تغییرات سطح آب زیرزمینی؛
- گزارش‌های ساکنان، بهره‌برداران یا مسئولان نگهداری ساختمان.

اطلاعات گزارش‌شده توسط ساکنان می‌تواند برای تعیین زمان تقریبی ظهور آسیب و روند ظاهری آن مفید باشد، اما باید با اندازه‌گیری و سایر شواهد فنی کنترل شود.

۳-۳-۲- بازدید میدانی و تهیه نقشه آسیب

در بازدید میدانی، بهتر است آسیب‌ها در پلان، نما و مقاطع ساختمان ثبت شوند. موارد زیر می‌توانند در بازدید مورد توجه قرار گیرند:

- ترک‌ها و تغییر شکل‌های اعضای باربر؛
- ترک‌های دیوارهای پرکننده و جداکننده؛
- وضعیت شالوده، شناژها، کف و اطراف ستون‌ها؛
- جداسازی میان دیوار و قاب، سقف یا کف؛
- کج شدگی ستون‌ها، دیوارها و نما؛
- افتادگی، برآمدگی یا اختلاف تراز کف؛
- گیرکردن درها و پنجره‌ها؛
- خردشدگی، لهیدگی، پوسته شدگی یا کماتش مصالح و اعضا؛
- نشست یا شکاف در محوطه پیرامونی؛
- آسیب خطوط آب، فاضلاب، گاز و سایر تأسیسات؛
- وضعیت ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور.

۳-۴- سازوکارهای محتمل ایجاد آسیب

خرابی‌های مشاهده شده در ساختمان‌های واقع در پهنه‌های فرونشست، معمولاً ناشی از تغییر شکل‌های نسبی زمین و پی هستند. نشست یکنواخت کل ساختمان، در صورت عدم همراهی با شیب، کرنش افقی و اعوجاج، الزاماً باعث خرابی جدی در سازه نمی‌شود. خطر خرابی معمولاً زمانی افزایش می‌یابد که نشست به صورت غیریکنواخت، همراه با چرخش، انحناء، کرنش افقی یا جابه‌جایی جانبی رخ دهد. این تغییر شکل‌ها در سه گروه اصلی قابل بررسی هستند.

۳-۴-۱- نشست غیریکنواخت

هنگامی که بخش‌های مختلف پی یک ساختمان با مقادیر یا نرخ‌های متفاوت نشست کنند، سازه مجبور به تحمل تغییر شکل‌هایی می‌شود که در طراحی اولیه برای آن پیش‌بینی نشده است. این وضعیت باعث ایجاد لنگرهای خمشی اضافی، نیروهای برشی، دوران تکیه‌گاه‌ها و باز توزیع نیروها در اعضای سازه‌ای می‌گردد. نشست تفاضلی یکی از عوامل مهم ایجاد آسیب در ساختمان‌ها، به ویژه ترک‌خوردگی در دیوارهای بنایی، اجزای غیر سازه‌ای، شالوده و در برخی موارد اعضای سازه‌ای است.

۳-۴-۲- کرنش افقی کششی

در بخش‌هایی از پهنه فرونشست ممکن است فاصله میان نقاط زمین افزایش یابد و کرنش کششی افقی ایجاد شود. در صورت انتقال بخشی از این تغییر شکل به پی و ساختمان، اجزای ترد مانند بنایی، بتن، اندود و نما می‌توانند دچار بازشدگی و ترک‌خوردگی شوند.

ترک‌های ناشی از کشش معمولاً تمایل دارند تقریباً عمود بر راستای کشش غالب ایجاد شوند. در دیوار قائم، کشش افقی ممکن است با ترک‌های قائم یا نزدیک به قائم همراه باشد. این ترک‌ها ممکن است در دیوارهای باربر، دیوارهای طبقه همکف، شالوده، درزهای اجرایی یا محل تغییر سختی ایجاد شوند.

وجود ترک قائم به‌تنهایی اثبات‌کننده کرنش کششی زمین نیست و باید با جهت تغییر فاصله نقاط، وضعیت پی و الگوی کلی آسیب کنترل شود.

۳-۴-۳- کرنش افقی فشاری

کاهش فاصله میان نقاط زمین می‌تواند با کرنش فشاری افقی همراه باشد. در صورت انتقال این کرنش به ساختمان، امکان ایجاد فشار اضافی، بسته شدن درزها، تمرکز تنش و ناپایداری موضعی برخی اجزا وجود دارد. نواحی دارای ناپیوستگی، مانند بازشوهای در و پنجره، به ویژه در دیوارهای بنایی تحت فشار، مستعد تمرکز تنش و کرنش هستند. در مصالح بنایی، تنش‌های فشاری شدید می‌تواند با آسیب فشاری، ترک‌خوردگی و خردشدگی موضعی مصالح همراه شوند. این نشانه‌ها ممکن است ناشی از بارگذاری ثقلی، ضعف مصالح، خوردگی، ضربه یا عوامل اجرایی نیز باشند و باید همراه با سایر شواهد بررسی شوند.

۳-۴-۴- جابه‌جایی افقی و عوامل موضعی هم‌زمان

در برخی شرایط، تغییر شکل زمین تنها به جابه‌جایی قائم محدود نمی‌شود و ممکن است با مؤلفه افقی نیز همراه باشد. این وضعیت می‌تواند در اثر تغییرات جانبی و ناهمگنی لایه‌های رسوبی، از جمله تفاوت در ضخامت، جنس، سختی و تراکم‌پذیری لایه‌ها و تفاوت در پاسخ تحکیمی آن‌ها، ایجاد یا تشدید شود. همچنین، جابه‌جایی افقی ممکن است در مجاورت گودبرداری‌های عمیق، پروژه‌های زیرزمینی، نواحی متأثر از کاهش سطح آب زیرزمینی یا زمین‌های کارستی دارای حفره رخ دهد. در این شرایط، پی ساختمان ممکن است علاوه بر نشست، دچار جابه‌جایی افقی یا کج شدگی شود و در نتیجه تغییر شکل و آسیب ساختمان، از جمله نشست، ترک یا کج شدگی، نیازمند ارزیابی و پایش باشد.

در چنین شرایطی، مناسب است سهم احتمالی عوامل منطقه‌ای و موضعی به‌صورت جداگانه بررسی شود. قرارگیری ساختمان در پهنه فرونشست به‌تنهایی به معنی آن نیست که تمام آسیب‌های مشاهده‌شده از فرونشست منطقه‌ای ناشی شده‌اند.

۳-۵- منشأ یابی و طبقه‌بندی ترک‌ها

ترک‌ها از شاخص‌های مهم ارزیابی آسیب‌دیدگی ساختمان محسوب می‌شوند و می‌توانند شواهد پشتیبان لازم را برای بررسی ارتباط میان حرکت زمین، پی و ساختمان فراهم کنند. با توجه به موضوع این راهنما، شناخت الگوهای ترک مرتبط با فرونشست و سایر تغییر شکل‌های زمین و پی اهمیت دارد. با این حال، تشخیص این ترک‌ها بدون آشنایی با ترک‌های ناشی از عوامل سازه‌ای، تغییرات مصالح، شرایط حرارتی و رطوبتی و سایر عوامل مؤثر امکان‌پذیر نیست؛ زیرا ترک‌های دارای منشأهای متفاوت ممکن است الگوهای ظاهری مشابهی داشته باشند.

هیچ نظام طبقه‌بندی واحدی نمی‌تواند تمام جنبه‌های یک ترک را توصیف کند. از این‌رو، در این راهنما ترک‌ها از پنج دیدگاه بررسی می‌شوند:

(الف) نقش و اهمیت جزء آسیب‌دیده، شامل ترک‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای؛

(ب) منشأ احتمالی، شامل ترک‌های مرتبط و غیر مرتبط با حرکت زمین و پی؛

(پ) سازوکار مکانیکی، شامل خمش، برش، کشش، فشار و جداسازی؛

(ت) مشخصات و الگوی ظاهری ترک؛

(ث) وضعیت فعالیت ترک.

این طبقه‌بندی‌ها مکمل یکدیگر هستند و هر یک جنبه متفاوتی از محل وقوع، منشأ، سازوکار، ظاهر یا روند تغییرات ترک را توصیف می‌کنند. یک ترک ممکن است به‌طور هم‌زمان، در یک عضو سازه‌ای، ناشی از نشست تفاضلی، دارای سازوکار برشی، با الگوی مورب و در وضعیت فعال باشد.

۳-۵-۱- اصول توصیف و محدودیت تفسیر ترک

در توصیف و ثبت ترک، بهتر است محل وقوع، عضو یا مصالح درگیر، جهت، شکل، طول، پهنا، عمق، تعداد، نحوه توزیع، وضعیت لبه‌ها، وجود جابه‌جایی نسبی دو سوی ترک و ارتباط آن با سایر تغییر شکل‌های ساختمان ثبت شود. همچنین، وجود رطوبت، پوسته‌شدگی، خردشدگی، برآمدگی یا سایر علائم همراه می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

تشخیص منشأ ترک نباید صرفاً بر اساس شکل، جهت یا پهنای آن انجام شود. ترک‌های دارای ظاهر مشابه ممکن است بر اثر سازوکارهای متفاوت ایجاد شده باشند و مسیر ترک نیز ممکن است تحت تأثیر بازشوها، بندهای ملات، درزهای اجرایی، محل اتصال مصالح و سایر مسیرهای ضعیف تغییر کند.

نتیجه‌گیری درباره منشأ ترک باید با توجه هم‌زمان به نقش عضو، نوع مصالح، وضعیت زمین و پی، الگوی تغییر شکل کلی ساختمان، سوابق آسیب و در صورت نیاز، نتایج اندازه‌گیری و پایش انجام شود.

۳-۵-۲- طبقه‌بندی بر اساس نقش جزء آسیب‌دیده

تفکیک ترک‌ها بر اساس وقوع آن‌ها در اجزای سازه‌ای یا غیر سازه‌ای می‌تواند در تعیین اهمیت آسیب، اولویت بررسی و سطح ارزیابی مؤثر باشد. این تفکیک بر اساس نقش جزء آسیب‌دیده انجام می‌شود و نباید با منشأ ایجاد ترک یا اهمیت سازه‌ای آن اشتباه گرفته شود.

یک عامل مرتبط با حرکت زمین، پی یا سازه ممکن است موجب ترک در جزء غیر سازه‌ای شود. همچنین، عوامل مرتبط با مصالح، اجرا یا دوام ممکن است در یک عضو سازه‌ای ترک ایجاد کنند. از این‌رو، نقش جزء آسیب‌دیده، منشأ احتمالی ترک و آثار آن بر عملکرد ساختمان بهتر است به صورت جداگانه تعیین و ثبت شوند.

قرارگیری ترک بر سطح یک عضو سازه‌ای نیز به تنهایی به معنی ترک خوردگی خود عضو نیست؛ زیرا ممکن است ترک فقط به اندود، پوشش، ملات سطحی یا سایر مصالح غیر سازه‌ای روی عضو محدود شده باشد.

۳-۵-۲-۱ ترک در اجزای سازه‌ای

ترک در جزء سازه‌ای، ترکی است که در عضو، اتصال یا جزء مؤثر در سیستم باربر قائم یا جانبی ساختمان، مانند تیر، ستون، دیوار باربر، دیوار برشی، دال سازه‌ای، شالوده، کلاف، مهاربند یا اتصال سازه‌ای ایجاد شده باشد. وجود ترک در یک جزء سازه‌ای به تنهایی به معنی کاهش ظرفیت یا ناپایداری آن نیست. اهمیت سازه‌ای ترک با توجه به موارد زیر بررسی می‌شود:

- سازگاری موقعیت، جهت، عمق و الگوی ترک با سازوکارهایی مانند خمش، برش، کشش، فشار، پیچش، لغزش یا گسیختگی اتصال؛
- ارتباط ترک با تغییر شرایط تکیه‌گاهی، مسیر انتقال نیرو یا باز توزیع نیروها؛
- آثار احتمالی ترک بر ظرفیت باربری، سختی، پایداری، یکپارچگی، قابلیت بهره‌برداری یا دوام عضو و سیستم سازه‌ای.

نشانه‌هایی مانند خیز یا کج شدگی غیرعادی، خردشدگی، لهیدگی، پوسته شدگی گسترده، کمانش، جابه‌جایی نسبی یا آسیب اتصال، به تنهایی ماهیت یا شدت سازه‌ای ترک را اثبات نمی‌کنند؛ با این حال، می‌توانند اهمیت آسیب، اولویت بررسی و ضرورت ارزیابی تفصیلی را افزایش دهند.

۳-۵-۲-۲ ترک در اجزای غیر سازه‌ای

ترک در جزء غیر سازه‌ای، ترکی است که در جزء فاقد نقش مستقیم در سیستم باربر قائم یا جانبی ساختمان، مانند اندود، نمای غیر باربر، کف‌سازی، سقف کاذب، تیغه یا دیوار جداکننده غیر باربر ایجاد شده باشد. وقوع ترک در جزء غیر سازه‌ای به معنی غیر سازه‌ای بودن منشأ آن یا بی‌اهمیت بودن آسیب نیست. این ترک ممکن است مستقیماً از تغییرات مصالح، ضعف اتصال، تغییرات حرارتی یا رطوبتی ناشی شده باشد یا در اثر تغییر شکل زمین، پی، قاب یا سایر اعضای سازه‌ای ایجاد شده باشد.

در حالت دوم، ترک از نظر محل وقوع در جزء غیر سازه‌ای قرار دارد، اما می‌تواند نشانه‌ای از تغییر شکل سیستم تکیه‌گاهی یا سازه اصلی باشد. در صورتی که ترک با نشست، اختلاف تراز، کج شدگی، خیز غیرعادی، تغییر شکل قاب، گیرکردن بازشوها، جابه‌جایی نسبی اجزا یا سایر نشانه‌های حرکت زمین، پی یا سازه همراه باشد، بررسی نباید به ترمیم موضعی جزء محدود شود و ارتباط آن با رفتار کلی ساختمان نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۵-۳- طبقه‌بندی بر اساس منشأ احتمالی

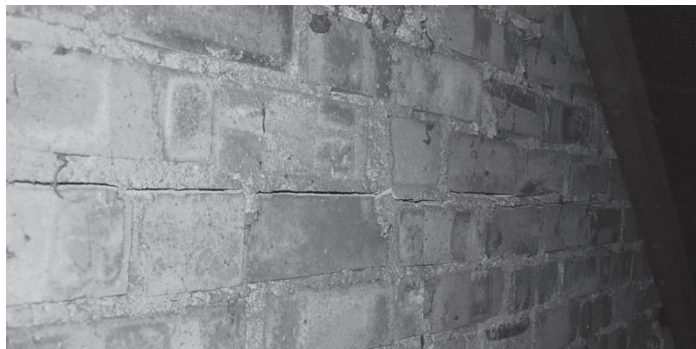
بر اساس منشأ احتمالی، ترک‌ها را می‌توان در دو گروه کلی ترک‌های غیر مرتبط با حرکت زمین و پی و ترک‌های مرتبط با حرکت زمین و پی بررسی کرد. این تفکیک مقدماتی است و انتساب قطعی ترک به هر گروه باید بر اساس مجموعه شواهد مربوط به مصالح، سازه، پی، زمین و روند تغییرات انجام شود.

۳-۵-۳-۱- ترک‌های غیر مرتبط با حرکت زمین و پی

ظاهر شدن ترک در دیوارها، سقف‌ها و سایر اجزای ساختمان لزوماً به معنای حرکت پی نیست. در بسیاری از موارد، منشأ ترک در خود مصالح یا اجزای ساختمان قرار دارد و ترک خوردگی بر اثر تغییرات فیزیکی یا شیمیایی، تنش بیش از حد یا ارتعاش ایجاد می‌شود. این ترک‌ها در دو دسته تقسیم می‌شوند.

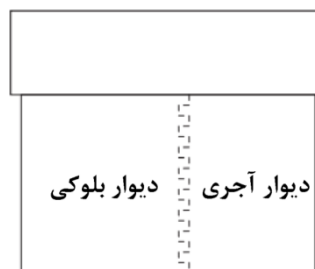
الف) ترک‌های دیوارها و مصالح بنایی

- ترک‌های ناشی از خوردگی: فولاد یا آهن کار گذاشته شده در دیوارها ممکن است در مجاورت رطوبت دچار خوردگی شود. محصولات خوردگی، حجمی بیشتر از فلز اولیه دارند و این افزایش حجم، مصالح اطراف را از یکدیگر دور می‌کند و موجب ترک خوردگی موضعی، پوسته‌شدن لبه‌ها و گوشه‌ها یا ایجاد لکه در امتداد قطعات فولادی می‌شود. ترک‌ها معمولاً در امتداد نعل درگاه‌های آهنی، بست‌ها، براکت‌های فلزی یا سایر اجزای فولادی مدفون ظاهر می‌شوند. ترک خوردگی مشابهی ممکن است در اطراف آجرهای هواکش آهنی رخ دهد و انبساط ناشی از خوردگی، بندهای آجرکاری یا آجرهای مجاور را به سمت بالا یا بیرون حرکت دهد. در دیوارهای دوجداره، جداره داخلی و خارجی با بست‌های فلزی به یکدیگر متصل می‌شوند. این بست‌ها ممکن است به مرور زمان دچار خوردگی شوند و افزایش حجم محصولات خوردگی، آجرکاری را بالا ببرد. ترک‌ها معمولاً افقی هستند. ترک خوردگی معمولاً ابتدا در قسمت‌های بالایی دیوار، درست زیر لبه بام یا بالای تراز دیوار شیروانی آغاز می‌شود؛ زیرا وزن وارد بر آجرکاری در این قسمت کمتر است. با ادامه خوردگی، بازشدگی ترک‌ها افزایش می‌یابد و ترک‌های جدید در قسمت‌های پایین‌تر دیوار ایجاد می‌شوند. نخستین نشانه ممکن است در سطح داخلی دیوار شیروانی و داخل فضای زیر بام دیده شود (شکل (۳-۱)). با شکستن کامل بست‌ها، دو جداره از یکدیگر جدا می‌شوند و دیوار ممکن است به سمت داخل یا خارج برآمده شود. این عیب ماهیتی پیش‌رونده دارد و ممکن است در نماهای در معرض عوامل جوی، به ویژه نماهای جنوبی و جنوب غربی زودتر ظاهر شود.



شکل ۳-۱- ترک افقی ناشی از خوردگی و قوس برداشتن دیوار

- ترک‌های ناشی از حرکت تفاضلی میان مصالح مختلف: حرکت تفاضلی می‌تواند در محل اتصال دو نوع مصالح متفاوت، مانند بلوک‌چینی و آجرکاری، ایجاد شود. تفاوت رفتار مصالح در برابر تغییرات دما، رطوبت یا سایر شرایط محیطی موجب می‌شود دو بخش به میزان یکسان حرکت نکنند و ترک در امتداد مرز اتصال آن‌ها تشکیل شود. ترک معمولاً مویی است، اما بسته به میزان اختلاف حرکت ممکن است عرض آن به یک تا دو میلی‌متر نیز برسد. این ترک‌خوردگی معمولاً پیش‌رونده نیست و شدت آن با گذشت زمان افزایش نمی‌یابد (شکل (۳-۲)).



شکل ۳-۲- ترک‌های ناشی از حرکت تفاضلی مرتبط با مصالح متفاوت

- ترک‌های ناشی از جمع شدگی آجرهای ماسه آهکی: آجرهای سیلیکات کلسیم طی فرایند تولید مقدار زیادی رطوبت جذب می‌کنند. این آجرها پس از تولید و هنگام خشک شدن جمع می‌شوند و جمع شدگی اولیه آن‌ها برگشت‌ناپذیر است. اگر آجرها پیش از کامل شدن این جمع شدگی در دیوار چیده شوند، ترک‌خوردگی قابل‌توجهی ایجاد می‌شود. ترک‌ها معمولاً در بندهای ملات تشکیل می‌شوند و ظاهری نامنظم دارند. مسیر آن‌ها ممکن است از بخش‌های ضعیف و باریک آجرکاری میان بازشوهای در و پنجره عبور کند. جابه‌جایی عمده‌تاً افقی است و ترک‌های افقی معمولاً مویی هستند. عرض ترک‌ها ممکن است از حالت مویی تا حدود دو میلی‌متر باشد. این ترک‌ها عمده‌تاً به جداره خارجی حاوی آجرهای سیلیکات کلسیم محدود می‌شوند.

- ترک‌های ناشی از انبساط حرارتی آجرکاری: ترک‌خوردگی ناشی از انبساط یکی از شکل‌های رایج ترک‌خوردگی در آجرکاری است. میزان حرکت به ضریب انبساط حرارتی مصالح و دامنه تغییرات دما بستگی دارد؛ بنابراین،

این ترک‌ها بیشتر در نماهای جنوبی و جنوب غربی که در معرض تابش مستقیم خورشید هستند مشاهده می‌شوند (شکل (۳-۳)). در آجرهای رسی، عرض ترک معمولاً از حالت مویی تا حدود یک تا سه میلی‌متر است، اما در نماهای طولانی یا مصالحی مانند آجرهای سیلیکات کلسیم و بلوک‌های بتنی می‌تواند بیشتر باشد. حرکت اصلی افقی است و در نتیجه، ترک معمولاً قائم و عمود بر جهت حرکت تشکیل می‌شود. عرض ترک در امتداد ارتفاع تقریباً یکنواخت است، هرچند ممکن است در بالای دیوار کمی عریض‌تر باشد. اگر ترک به علت وجود بازشوها از مسیر قائم منحرف شود، بخش‌های افقی آن معمولاً مویی خواهند بود. ترک‌ها به زیر لایه عایق رطوبتی ادامه نمی‌یابند؛ زیرا آجرکاری زیر تراز زمین به وسیله خاک مهار شده و کمتر در معرض تغییرات دما قرار دارد.



شکل ۳-۳- نمای نزدیک از یک ترک انبساطی با جابه‌جایی افقی ۱ تا ۲ میلی‌متر

- ترک‌های ناشی از حمله سولفاتی در آجرکاری، ملات و اندود: حمله سولفاتی واکنشی شیمیایی و انبساطی است که در حضور آب میان سولفات‌ها و ترکیبات موجود در سیمان رخ می‌دهد. سولفات‌ها ممکن است از آجر، آب زیرزمینی، زمین، گچ یا سایر مصالح منشأ بگیرند. در آجرکاری، معمولاً ملات یا اندود سیمانی مورد حمله قرار می‌گیرد. واکنش شیمیایی ابتدا موجب انبساط، ترک‌خوردگی و پوسته‌شدن ملات یا اندود می‌شود و در مراحل پیشرفته‌تر ممکن است حرکت، قوس برداشتن و گسیختگی مصالح بنایی را به دنبال داشته باشد. ترک‌ها در اندود معمولاً به شکل شبکه‌ای و نامنظم ظاهر می‌شوند و در نواحی مرطوب دیوار، مانند زیر طاقچه پنجره تمرکز بیشتری دارند. ممکن است لکه‌ها و رسوبات سفید در بندهای ملات یا در امتداد ترک‌ها مشاهده شود. دیوارهای جان‌پناه، دیوارهای مستقل و دیوارهای حائل که برای مدت طولانی مرطوب باقی می‌مانند، بیشتر در معرض این نوع ترک‌خوردگی قرار دارند.

(ب) ترک‌های اجزای بتنی

- ترک‌های افت پلاستیک (Plastic Shrinkage Cracking): ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری پیش از گیرش اولیه و در اثر خشک شدن زودهنگام سطح بتن تازه ایجاد می‌شود. هنگامی که رطوبت سطح بتن سریع‌تر از آب انداختگی تبخیر شود، سطح بتن تمایل به جمع شدن پیدا می‌کند؛ اما بتن زیرین و فولاد تقویتی مدفون مانع این جمع‌شدگی می‌شوند. در نتیجه، تنش کششی در بتن خمیری ضعیف ایجاد می‌شود و در صورت بیشتر شدن آن از مقاومت کششی بتن، سطح ترک می‌خورد. این ترک‌ها معمولاً کم‌عمق‌اند و ممکن است به صورت تصادفی، چندضلعی، نقشه‌ای یا تقریباً موازی با یکدیگر ظاهر شوند. عرض آن‌ها در سطح بیشتر است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. عرض سطحی ترک ممکن است به حدود ۳ میلی‌متر برسد و طول آن از چند سانتی‌متر تا چند متر متغیر باشد. این ترک‌ها در ابتدا سطحی‌اند، اما ممکن است در ادامه عمر بتن عمیق‌تر شوند.
- ترک نشست پلاستیک (Plastic Settlement Cracking): بتن پس از ریختن، ویریه کردن و پرداخت همچنان تمایل به تراکم و نشست دارد. اگر حرکت بتن خمیری به صورت موضعی به وسیله میلگردهای تقویتی، بتن‌ریزی قبلی، قالب یا عامل دیگری محدود شود، در مجاورت عامل محدودکننده حفره، ترک یا هر دو ایجاد می‌شود. ترک‌های ناشی از نشست در اطراف و امتداد میلگردها تشکیل می‌شوند و شدت آن‌ها با افزایش قطر میلگرد، افزایش اسلامپ و کاهش ضخامت پوشش بتن بیشتر می‌شود. ویریه ناکافی و استفاده از قالب‌های نشت‌کننده یا بسیار انعطاف‌پذیر نیز می‌تواند شدت این ترک‌خوردگی را افزایش دهد.
- ترک‌خوردگی ناشی از حمله سولفاتی به بتن (Sulfate Attack Cracking): حمله سولفاتی واکنشی انبساطی میان سولفات‌ها و محصولات هیدراتاسیون خمیر سیمان سخت شده است. سولفات‌ها ممکن است از منابع خارجی مانند خاک، آب زیرزمینی، آب دریا، فاضلاب، پسماندهای صنعتی یا مصالح پرکننده منشأ بگیرند. محصولات حاصل از واکنش حجمی بیشتر از مواد اولیه اشغال می‌کنند و موجب انبساط داخلی، ایجاد ترک‌های نزدیک به یکدیگر و در نهایت تخریب بتن می‌شوند. آسیب ممکن است به شکل ترک‌خوردگی نقشه‌ای ظاهر شود و با پوسته‌شدن یا تشکیل رسوبات مایل به سفید، روی سطح همراه باشد. در حمله سولفاتی خارجی، تخریب معمولاً از سطح در معرض سولفات آغاز شده و به سمت داخل پیشروی می‌کند. حمله سولفاتی داخلی نیز ممکن است بر اثر تشکیل تأخیری اترینگایت در بتنی رخ دهد که هنگام عمل‌آوری در معرض دمای زیاد و سپس در معرض رطوبت قرار گرفته است؛ ظاهر این حالت نیز معمولاً به صورت ترک‌خوردگی نقشه‌ای است.

• ترک‌های افت خشک‌شدگی (Drying Shrinkage Cracking): جمع شدگی ناشی از خشک شدن بر اثر از دست رفتن رطوبت خمیر سیمان در بتن سخت شده رخ می‌دهد. اگر بتن بتواند آزادانه جمع شود، ترک ایجاد نمی‌شود؛ اما هنگامی که این حرکت به وسیله آرماتور، بستر زیرین، اجزای صلب مجاور یا بخش داخلی مرطوب بتن محدود شود، تنش کششی به وجود می‌آید و در صورت بیشتر شدن آن از مقاومت کششی بتن، ترک تشکیل می‌شود. در اعضای حجیم، تفاوت میزان جمع شدگی میان سطح و بخش داخلی می‌تواند موجب ایجاد ترک‌هایی شود که با گذشت زمان به عمق بیشتری نفوذ می‌کنند. ترک‌ها معمولاً تقریباً عمود بر جهت قید هستند؛ در دال‌های طویل و باریک ممکن است به صورت عرضی، در گوشه‌های داخلی به صورت مورب و در صورت عملکرد نامناسب درزها به شکل تصادفی ظاهر شوند.

• ترک‌های سطحی پوست‌ماری (Crazing of Concrete): ترک مویی شبکه‌ای سطحی مجموعه‌ای از ترک‌های بسیار ریز، کم عمق و نزدیک به یکدیگر است که الگویی شبیه پوست تمساح روی سطح دیوارها یا دال‌های بتنی ایجاد می‌کند. این پدیده نمونه‌ای از جمع شدگی ناشی از خشک شدن در مقیاس سطحی است و معمولاً زمانی رخ می‌دهد که میزان آب در لایه سطحی بتن بیشتر از بتن داخلی باشد. تفاوت جمع شدگی میان این لایه‌ها موجب تشکیل شبکه‌ای از ترک‌های سطحی ریز می‌شود. جمع شدگی برگشت‌ناپذیر ناشی از کربناسیون خمیر سیمان نیز می‌تواند به ایجاد چنین ترک‌خوردگی سطحی منجر شود.

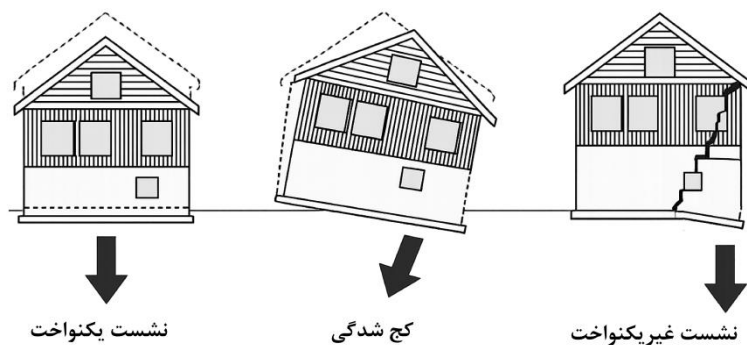
• ترک‌های ناشی از سیکل‌های یخبندان (D-Cracking due to Freeze and Thaw): هنگامی که بتن اشباع شده در معرض دمای یخبندان قرار می‌گیرد، آب موجود در مجاری مویینه، حفره‌های خمیر سیمان یا سنگ‌دانه‌ها یخ می‌زند و منبسط می‌شود. این انبساط، فشارهای داخلی ایجاد می‌کند و اگر فشارها از مقاومت کششی خمیر سیمان یا سنگ‌دانه بیشتر شوند، ترک‌خوردگی رخ می‌دهد. اثر تجمعی چرخه‌های متوالی یخ‌زدگی و ذوب از سطح بتن آغاز شده و به تدریج به سمت داخل پیشروی می‌کند. در مراحل اولیه، ترک‌ها منفردند؛ اما با ادامه مواجهه به یکدیگر متصل شده و ممکن است به ترک‌خوردگی سطحی موازی، رسوبات شورزدگی، پوسته‌شدن و در نهایت ترک‌خوردگی D منجر شوند. این آسیب بتن را تضعیف کرده و مسیر نفوذ بیشتر آب را فراهم می‌کند.

تذکر: الگوهای توصیف‌شده در این بند به تنهایی برای رد یا تأیید ارتباط ترک با حرکت زمین یا پی کافی نیستند. در مواردی ممکن است بیش از یک عامل، مانند تغییر حجم مصالح و تغییر شکل تکیه‌گاه، به صورت هم‌زمان در ایجاد یا گسترش ترک نقش داشته باشند.

۳-۵-۳- ترک‌های مرتبط با حرکت زمین و پی

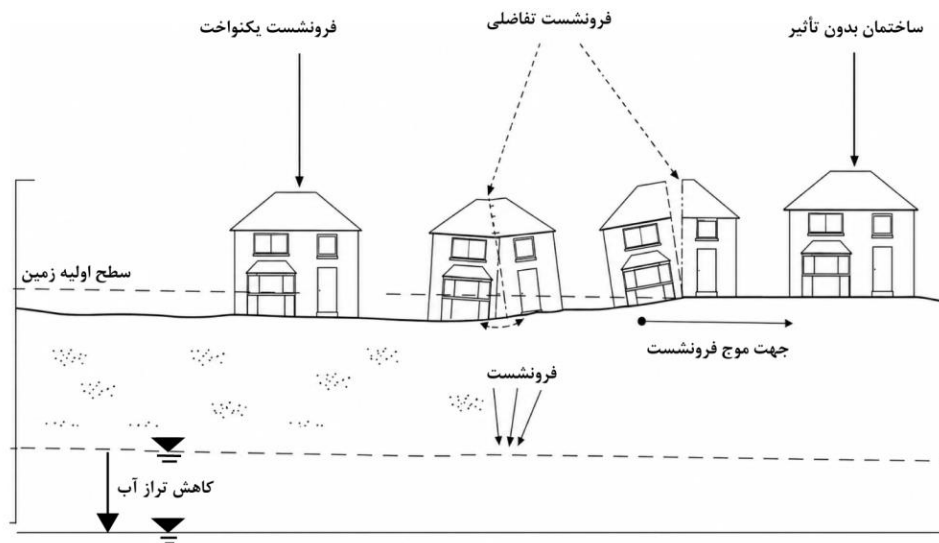
آسیب واردشده به ساختمان ناشی از اعوجاج و تغییر شکل ساختمان است، نه صرفاً حرکت مطلق پی. نشست یکنواخت کل ساختمان معمولاً موجب ترک‌خوردگی قابل توجه نمی‌شود. آنچه معمولاً باعث ایجاد ترک در ساختمان می‌شود،

نشست تفاضلی است؛ یعنی حالتی که یک بخش از ساختمان نسبت به بخش دیگر جابه‌جایی بیشتری داشته باشد. همان‌طور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است، به طور کلی نشست ساختمان از نظر شکل ظاهری می‌تواند به سه حالت اصلی نشست یکنواخت، کج شدگی و نشست غیریکنواخت دیده شود. در نشست یکنواخت، کل ساختمان تقریباً به صورت یکپارچه پایین می‌رود. در کج شدگی، ساختمان دچار چرخش می‌شود و در نشست غیریکنواخت، به علت اختلاف حرکت در بخش‌های مختلف پی، ترک‌خوردگی در ساختمان بروز می‌کند.



شکل ۳-۴ - انواع نشست از نظر شکل ظاهری

- ترک‌های ناشی از نشست پی: نشست پی معمولاً اندکی پس از ساخت ساختمان یا پس از انجام تغییراتی که موجب افزایش بار می‌شوند رخ می‌دهد. در این حالت، خاکی که پیش‌تر تحت چنین باری نبوده است، در اثر وزن ساختمان متراکم می‌شود و مقدار کمی حرکت در پی ایجاد می‌کند. این حرکت معمولاً محدود است و پس از پایان مرحله اولیه نشست دوباره تکرار نمی‌شود، اما ممکن است به صورت ترک‌های مویی در اطراف بازشوهای سازه‌ای یا ترک‌خوردگی تیغه‌های داخلی ظاهر شود. در ساختمان‌های قدیمی مجاور ساختمان جدید نیز ممکن است نشست موضعی در بخش‌هایی رخ دهد.
- ترک‌های ناشی از نشست تفاضلی پی: نشست تفاضلی زمانی رخ می‌دهد که بخش‌های مختلف پی به میزان یا با سرعت یکسان حرکت نکنند. این اختلاف حرکت ممکن است بر اثر توزیع نابرابر فشار در زیر سازه، بیشتر بودن فشار وارد بر خاک از ظرفیت باربری مجاز آن، پایین بودن ضریب اطمینان در طراحی پی یا تغییرات موضعی در جنس و شرایط بستر تکیه‌گاهی ایجاد شود. همچنین در ساختمان‌های ساخته شده بر خاک‌های با تراکم کم، نفوذ آب ناشی از بارندگی شدید یا سیلاب می‌تواند موجب نشست نامساوی خاک زیر پی شود. در نتیجه، اختلاف جابه‌جایی میان بخش‌های مختلف ساختمان به ایجاد ترک در سازه منجر می‌شود. ترک‌هایی که بر اثر حرکت پی در گوشه یا انتهای ساختمان ایجاد می‌شوند، معمولاً قطری هستند. این ترک‌ها در قسمت بالا عریض‌ترند و عرض آن‌ها به سمت پایین کاهش می‌یابد. تفاوت عرض ترک در ارتفاع دیوار یکی از ویژگی‌هایی است که این ترک‌ها را از ترک‌های ناشی از حرکات حرارتی یا رطوبتی متمایز می‌کند (شکل (۳-۵)).



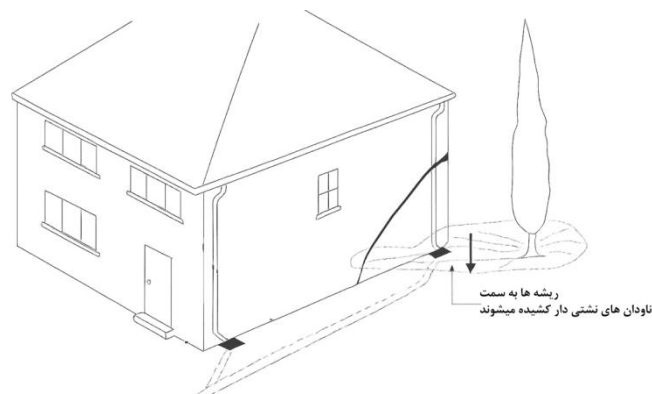
شکل ۳-۵- تغییر شکل ساختمان و زمین در اثر فرونشست

- ترک‌های ناشی از فرونشست: تفاوت اصلی فرونشست با نشست در این است که در فرونشست، منشأ حرکت به تغییرات خاک زیرسطحی مربوط می‌شود، نه صرفاً به بار وارد شده از طرف ساختمان. تفکیک فرونشست منطقه‌ای از نشست موضعی مطابق بند ۲-۳-۳ انجام می‌شود. وجود ترک یا حرکت پی به‌تنهایی برای انتساب آسیب به فرونشست منطقه‌ای کافی نیست. برداشت آب زیرزمینی و تراکم رسوبات می‌تواند در ایجاد فرونشست منطقه‌ای نقش داشته باشند. در مقابل، نشت آب و فاضلاب، گودبرداری، حفاری، تراکم ناکافی خاک، تغییر بارگذاری، تغییر رطوبت خاک‌های رسی و اثر پوشش گیاهی معمولاً به‌عنوان عوامل موضعی مؤثر بر حرکت زمین و پی بررسی می‌شوند.
 - ترک‌های ناشی از جمع شدگی خاک رس: خاک‌های رسی با تغییر میزان رطوبت دچار تغییر حجم می‌شوند. در دوره‌های طولانی هوای خشک، رطوبتی که درختان و سایر گیاهان از خاک جذب می‌کنند به‌اندازه کافی جایگزین نمی‌شود و در نتیجه، خاک رس جمع می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود، این جمع شدگی می‌تواند با ایجاد ترک در خود خاک همراه باشد. اگر این تغییر حجم در عمق پی رخ دهد، پی دچار نشست و حرکت چرخشی می‌شود. از آنجا که معمولاً میزان جمع شدگی در سمت نزدیک‌تر به درخت بیشتر است، دیوار نیز به‌طور نامتقارن نشست کرده و حول ناحیه‌ای مشخص می‌چرخد و در آن ترک ایجاد می‌شود.
- ترک‌های ناشی از جمع شدگی خاک رس معمولاً قطری و با زاویه‌ای در حدود ۴۵ درجه هستند، هرچند وجود بازشوها می‌تواند مسیر ترک را تغییر دهد. عرض این ترک‌ها با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود. در دو سوی ترک، هم جابه‌جایی افقی و هم جابه‌جایی قائم مشاهده می‌شود. ترک ممکن است از لایه عایق رطوبتی عبور کند، به زیر تراز زمین ادامه یابد و در سطوح داخلی و خارجی ساختمان ظاهر شود.



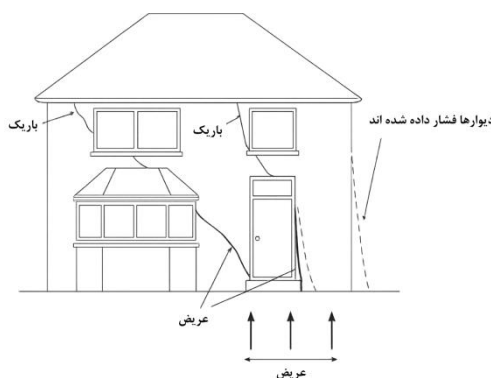
شکل ۳-۶- ترک خوردگی خاک رس خشک شده و جمع شدگی ناشی از کاهش رطوبت

- ترک‌های مرتبط با درختان و کاهش رطوبت خاک رس: تأثیر اصلی درختان بر ساختمان معمولاً از طریق اثری است که بر میزان رطوبت خاک رسی زیر ساختمان می‌گذارند. برای آنکه درخت بتواند موجب حرکت پی شود، وجود خاک رسی در زیر ساختمان شرط اصلی است. هرچه درخت بزرگ‌تر باشد و حجم برگ بیشتری داشته باشد، معمولاً آب بیشتری از خاک جذب می‌کند. میزان اثر پوشش گیاهی به نوع و اندازه گیاه، میزان مصرف آب، فاصله از ساختمان، عمق پی، ویژگی‌های خاک و شدت و مدت دوره‌های خشک بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۳-۷) به صورت شماتیک نشان داده شده است، کاهش رطوبت خاک در مجاورت درخت می‌تواند موجب حرکت زمین و در نتیجه بروز ترک در ساختمان شود.
- حرکات مرتبط با خاک‌های رسی و پوشش گیاهی می‌تواند به صورت حرکات فصلی عادی ناشی از تبخیر، حرکات فصلی تشدید شده در اثر جذب آب توسط درختان، فرونشست بلندمدت در نتیجه تداوم کمبود آب و نیز تورم بلندمدت پس از برطرف شدن کمبود پایدار آب ظاهر شود. ترک‌های ناشی از کاهش رطوبت خاک در مجاورت درختان معمولاً همان ویژگی‌های ترک ناشی از جمع شدگی رس را دارند؛ یعنی غالباً قطری‌اند، حالت گوه‌ای دارند، در دو سوی آن‌ها جابه‌جایی افقی و قائم دیده می‌شود و عرض آن‌ها با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود.



شکل ۳-۷- نمایش شماتیک فرونشست و ترک خوردگی ساختمان در اثر کاهش رطوبت خاک رسی در مجاورت درخت

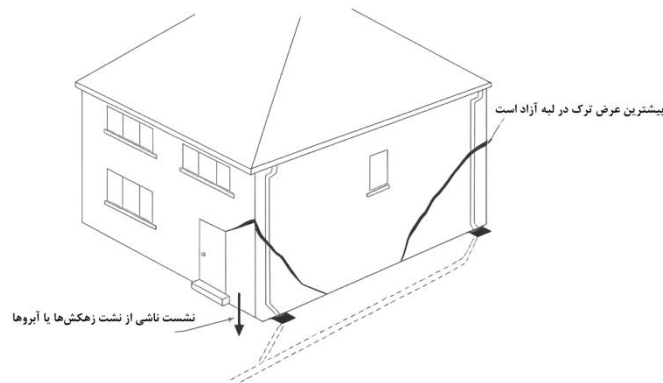
- ترک‌های ناشی از تورم یا بالآمدگی رس: تورم یا بالآمدگی رس در اثر افزایش رطوبت خاک زیرسطحی رخ می‌دهد. در این حالت، خاک رسی با جذب رطوبت منبسط می‌شود و می‌تواند پی، کف یا بخش‌هایی از ساختمان را به سمت بالا حرکت دهد. این پدیده ممکن است در اثر بارندگی، تغییر در مسیر آب، قطع شدن یک زهکش یا آبراهه زیرزمینی، برداشتن بار از روی زمین، یا حذف درختان، پرچین‌ها و بوته‌های نزدیک ساختمان ایجاد شود. هنگامی که درختی حذف می‌شود، خاکی که پیش‌تر بر اثر جذب آب توسط ریشه‌ها خشک شده بود، دوباره رطوبت جذب می‌کند و ممکن است طی چند سال متورم شود.
- الگوی ترک ناشی از تورم به محل انبساط خاک و بخشی از ساختمان که تحت تأثیر قرار گرفته است بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۳-۸) دیده می‌شود، این ترک‌ها ممکن است الگوی معکوس نسبت به ترک‌های ناشی از فرونشست داشته باشند؛ به‌گونه‌ای که در برخی موارد، عرض ترک در پایین بیشتر از بالا باشد. با این حال، این وضعیت همیشگی نیست. ترک‌های ناشی از تورم ممکن است قطری و با زاویه‌ای در حدود ۴۵ درجه یا تقریباً قائم باشند، اما معمولاً مانند ترک‌های فرونشستی حالت گوه‌ای دارند و یک انتهای آن‌ها از انتهای دیگر عریض‌تر است. در دو سوی ترک نیز ممکن است جابه‌جایی افقی و قائم مشاهده شود. این ترک‌ها می‌توانند تا زیر لایه عایق رطوبتی و تراز زمین ادامه یابند و در داخل و خارج ساختمان ظاهر شوند. عرض ۵ تا ۱۰ میلی‌متر برای این نوع ترک‌ها غیرمعمول نیست.



شکل ۳-۸- الگوی شماتیک ترک‌خوردگی ساختمان ناشی از تورم یا بالآمدگی خاک رس

- ترک‌های ناشی از نشت زهکش‌ها و تخلیه آب در مجاورت ساختمان: تخلیه آب باران در نزدیکی ساختمان یا نشت آب از زهکش‌ها و ناودان‌های زیرزمینی می‌تواند موجب نشست موضعی زمین و در نتیجه حرکت پی شود. در خاک‌های رسی، افزایش رطوبت باعث نرم‌تر و خمیری‌تر شدن خاک می‌شود و در خاک‌های غیر چسبنده مانند ماسه و شن، عبور آب می‌تواند ذرات ریز را با خود ببرد و موجب نشست موضعی خاک شود. این وضعیت معمولاً در نزدیکی محل زهکش معیوب یا محل تخلیه آب رخ می‌دهد و به همین دلیل، آسیب حالت موضعی دارد. ترک حاصل معمولاً الگوی رایج ترک فرونشست را نشان می‌دهد؛ یعنی با زاویه‌ای در حدود ۴۵ درجه ظاهر می‌شود، از میان بندهای آجرکاری عبور می‌کند و به‌صورت گوه‌ای است، به‌طوری‌که عرض آن با افزایش

ارتفاع بیشتر می‌شود. این حرکت معمولاً آهسته و تدریجی است و ممکن است در دوره‌های مرطوب سال شدت بیشتری پیدا کند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بیشترین آسیب در مجاورت محل نشت یا تخلیه آب ایجاد می‌شود و ترک‌ها از همان ناحیه در دیوار گسترش می‌یابند (شکل (۳-۹)).



شکل ۳-۹- فرونشست موضعی ناشی از نشت زهکش‌ها یا تخلیه آب در مجاورت ساختمان

- ترک‌های ناشی از حرکت فصلی خاک‌های رسی: یکی از علل ترک‌های جزئی ساختمان، تغییرات فصلی عادی در میزان رطوبت خاک است. خاک رسی با افزایش رطوبت منبسط و با کاهش رطوبت منقبض می‌شود و در نتیجه، ساختمان در هوای مرطوب اندکی بالا می‌آید و در هوای خشک اندکی نشست می‌کند. اگر حرکت در سراسر ساختمان یکنواخت باشد، معمولاً ترک قابل تشخیصی ایجاد نمی‌شود؛ اما بخش‌های کم بار ساختمان آسان‌تر از بخش‌های پر بار بالا می‌آیند و بخش‌های پر بار بیشتر نشست می‌کنند. این حرکت تفاضلی می‌تواند ترک‌های کوچک و عمدتاً قائم را در مرکز زیر پنجره‌های طبقه همکف و بازشوهای بزرگ در یا پنجره ایجاد کند. ترک‌های ناشی از حرکت فصلی معمولاً مویی تا حدود یک میلی‌متر هستند. پهنا یا وضعیت این ترک‌ها ممکن است در پاسخ به تغییرات فصلی رطوبت خاک تغییر کند.

۳-۵-۴- طبقه‌بندی بر اساس سازوکار مکانیکی

۳-۵-۴-۱- ترک‌های خمشی

ترک خمشی زمانی ایجاد می‌شود که تنش کششی ناشی از خمش از مقاومت کششی مصالح فراتر رود. این ترک‌ها ممکن است در تیر، دال، دیوار، کلاف و شالوده ایجاد شوند.

در تیرهای بتن‌آرمه، ترک‌های خمشی معمولاً در ناحیه کششی عضو و به‌صورت قائم یا نزدیک به قائم ظاهر می‌شوند. در شرایط معمول بارگذاری ثقیلی، ترک‌ها معمولاً از پایین تیر شروع شده و به سمت بالا گسترش می‌یابند (شکل (۳-۱۰)). در ناحیه لنگر منفی، مانند بالای تکیه‌گاه‌ها در تیرهای پیوسته، ترک‌ها معمولاً از بالای تیر شروع می‌شوند. نشست تفاضلی ممکن است توزیع لنگر و محل ناحیه کششی را تغییر دهد؛ بنابراین، نمی‌توان بدون بررسی تغییر شکل عضو،

به‌طور قطعی گفت که ترک حتماً در بالا یا پایین تیر ایجاد می‌شود. محل ترک باید بر اساس شکل تغییر مکان عضو و محل ایجاد کشش در آن بررسی شود.

ویژگی‌های سازگار با ترک خمشی می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- ترک‌ها معمولاً در ناحیه کششی عضو ایجاد می‌شوند؛
- در تیرها، غالباً به‌صورت قائم یا نزدیک به قائم دیده می‌شوند؛
- پهنای ترک در وجه کششی بیشتر بوده و با نزدیک شدن به محور خنثی کاهش می‌یابد؛
- در تیرها و دال‌های بتن‌آرمه، وجود ترک خمشی به‌تنهایی الزاماً به معنی خطر فوری نیست؛ اما افزایش پهنای گسترش سریع، همراهی با خیز غیرعادی یا خردشدگی بتن ناحیه فشاری نشانه خطر جدی‌تر است.



شکل ۳-۱۰- نمونه‌ای از ترک‌های خمشی در سطح زیرین عضو بتنی

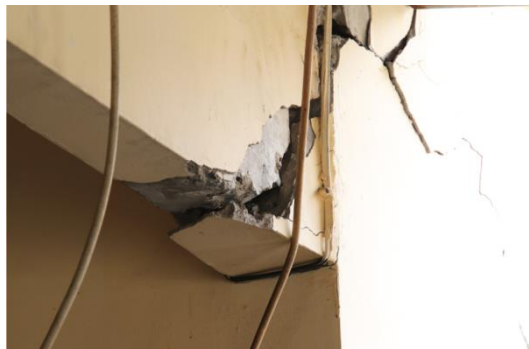
۳-۴-۵- ترک‌های برشی

ترک‌های برشی معمولاً مایل هستند و می‌توانند در اثر نیروی برشی یا ترکیب برش و خمش ایجاد شوند. در تیرها و ستون‌های بتن‌آرمه، ترک مایل در نزدیکی تکیه‌گاه یا اتصال ممکن است با افزایش تقاضای برشی سازگار باشد. در دیوارهای بنایی، ترک قطری یا پله‌ای می‌تواند در اثر اعوجاج دیوار، نشست تفاضلی یا تمرکز تنش اطراف بازو ایجاد شود. ترک‌های پله‌ای معمولاً از بندهای ملات عبور می‌کنند، زیرا بند ملات در بسیاری از موارد مسیر ضعیف‌تری نسبت به واحدهای آجری یا بلوکی است.

ویژگی‌های قابل توجه می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- ترک‌ها معمولاً مورب هستند و در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها، بازشوها یا نقاط تمرکز تنش دیده می‌شوند (شکل ۳-۱۱)؛
- در دیوارهای بنایی، ممکن است به‌صورت پله‌ای از بندهای ملات عبور کنند؛
- در بتن‌آرمه، ترک‌های برشی عمیق، باز شونده و همراه با خردشدگی بتن یا نمایان شدن خاموت‌ها باید به‌عنوان نشانه آسیب بررسی شوند؛

- وجود جابه‌جایی نسبی دو سوی ترک، بازشدگی قابل توجه یا افزایش سریع پهنا می‌تواند اهمیت آسیب، ضرورت پایش و اولویت بررسی را افزایش دهد.
- شکل مورب ترک به‌تنهایی برای تعیین خرابی برشی کافی نیست و باید با وضعیت نیروها، تغییر شکل کلی و مشخصات عضو مقایسه شود.



شکل ۳-۱۱- نمونه‌ای از آسیب برشی در ناحیه اتصال عضو

۳-۴-۵-۳ ترک‌های کششی

ترک کششی زمانی ایجاد می‌شود که عضو یا بخشی از ساختمان تحت کشش محوری یا کرنش کششی قرار گیرد. این ترک‌ها معمولاً تمایل دارند تقریباً عمود بر راستای کشش ایجاد شوند. در صورت انتقال کرنش کششی افقی زمین به پی و ساختمان، ترک‌های قائم یا نزدیک به قائم می‌توانند در دیوارهای طولی، محل اتصال دو بخش ساختمانی، اطراف بازشوها و محل تغییر سختی ظاهر شوند. ویژگی‌های سازگار با ترک کششی عبارت‌اند از:

- لبه‌های نسبتاً موازی؛
- بازشدگی نسبتاً یکنواخت در بخشی از طول ترک؛
- بازشدگی درزهای اجرایی یا اتصال بخش‌های ساختمانی.

۳-۴-۵-۴ ترک‌های جداشدگی

ترک جداشدگی در فصل مشترک دو عضو یا دو مصالح با سختی، سن ساخت، نحوه اتصال یا عملکرد متفاوت ایجاد می‌شود (شکل (۳-۱۲)). نمونه‌های متداول آن می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- فصل مشترک دیوار بنایی و ستون؛
- اتصال دیوار و سقف؛
- اتصال دیوار پرکننده و قاب؛
- اتصال نما و دیوار پشتیبان؛

• فصل مشترک اندود و بستر.

تغییر مکان متفاوت اجزاء، ضعف اتصال، جمع شدگی مصالح و تغییرات حرارتی نیز می‌توانند در ایجاد این ترک‌ها نقش داشته باشند. اگر ترک جداسدگی با لق شدن نما، بازسدگی اتصال یا خطر سقوط همراه باشد، بررسی ایمنی جزء غیر سازه‌ای اهمیت پیدا می‌کند.



شکل ۳-۱۲- ترک‌های جداسدگی بین دیوار و اجزای دیگر

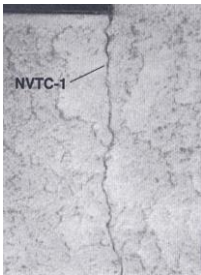
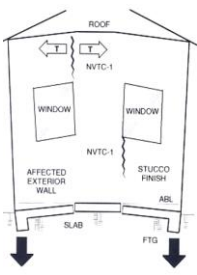
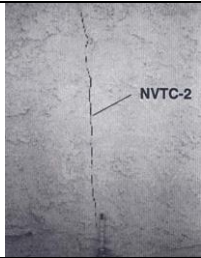
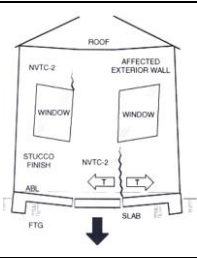
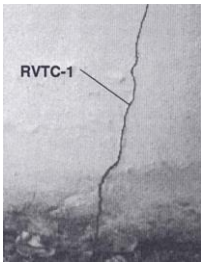
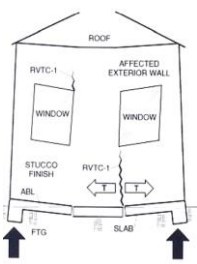
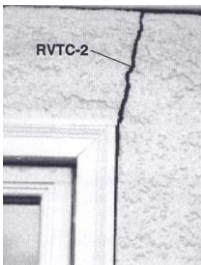
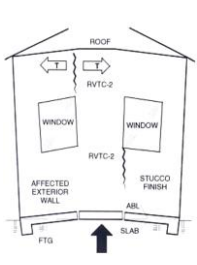
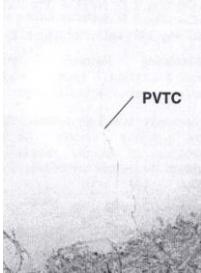
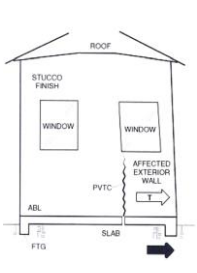
۳-۵-۵- طبقه‌بندی بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

الگوهای ترک مشاهده‌شده در دیوارهای خارجی اندود شده، دیوارهای داخلی پوشیده شده با گچ و دال‌های بتنی می‌توانند در شناسایی شرایط زمین‌شناختی مؤثر بر حرکت زمین و آسیب‌دیدگی ساختمان نقش داشته باشند. در نظام طبقه‌بندی بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری، الگوهای ترک ناشی از حرکت زمین به‌صورت نظام‌مند توصیف و کدگذاری می‌شوند. این نظام شامل هجده مدل ترک در دیوارها و یازده مدل ترک در دال‌های کف است. این مدل‌ها الگوهای بنیادی ترک را نشان می‌دهند که سایر الگوهای ترک می‌توانند بر پایه آن‌ها شکل گیرند. نظام طبقه‌بندی و توالی یکپارچه کدگذاری بر چهار مؤلفه شامل نوع حرکت زمین، راستای ترک، نوع تنش و نوع عارضه استوار است. حرکت‌های زمین به‌صورت نرمال (N)، معکوس (R)، جداسدگی (P) و لرزه‌ای (S) تعریف می‌شوند. راستاهای ترک در صفحه قائم، یعنی دیوارها، شامل قائم (V)، قطری (D) و افقی (H) هستند. راستاهای ترک در صفحه افقی، یعنی دال‌ها، نسبت به پی به‌صورت مورب (O)، موازی (P) و شعاعی (R) تعریف می‌شوند. انواع تنش شامل کششی (T)، فشاری (C) و برشی (S) هستند و نوع عارضه نیز ممکن است ترک (C) یا بازسدگی (G) باشد. بر این اساس، در جدول (۳-۱) کد و نام کامل هر مدل ترک، مشخصه‌های متمایزکننده، محل وقوع و طرح یا تصویر ترک یا شکاف مربوط به مدل‌های دیوار و دال ارائه شده است. فراوانی‌های بیان‌شده در جدول مربوط به دامنه مطالعات و انواع ساختمان‌های بررسی‌شده در منبع است و نباید بدون بررسی به سایر ساختمان‌ها تعمیم داده شود. الگوهای لرزه‌ای برای تشخیص افتراقی و مقایسه با سایر منشأهای ترک ارائه شده‌اند و در این راهنما به‌عنوان الگوی ناشی از فرونشست تلقی نمی‌شوند.

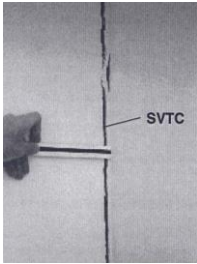
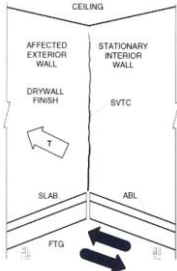
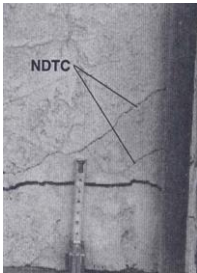
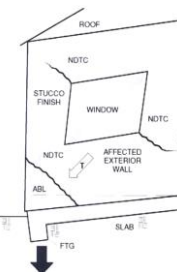
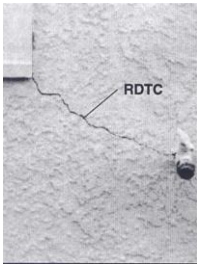
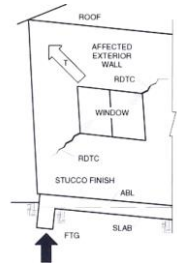
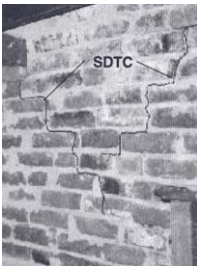
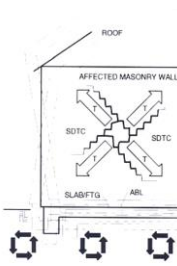
الگوهای ترک مشاهده‌شده در دیوارهای خارجی اندود شده، دیوارهای داخلی دارای پوشش گچی و دال‌های بتنی می‌توانند در توصیف نظام‌مند آسیب و ارائه فرضیه اولیه درباره نوع تغییر شکل مؤثر باشند. کدهای این بخش صرفاً برای

توصیف و ثبت الگوی ظاهری ترک به کار می‌روند و به‌تنهایی مبنای تعیین منشأ، سازه‌ای یا غیر سازه‌ای بودن، وضعیت فعالیت یا رده خرابی نیستند. نتیجه‌گیری درباره منشأ ترک باید با سایر شواهد ساختمان، پی و زمین تطبیق داده شود.

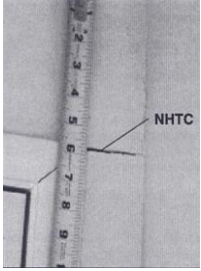
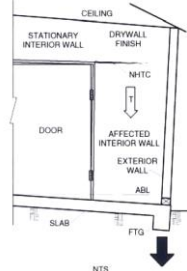
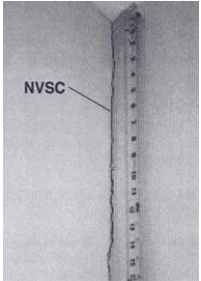
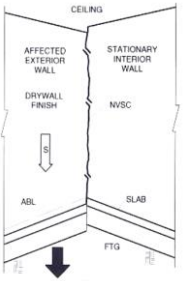
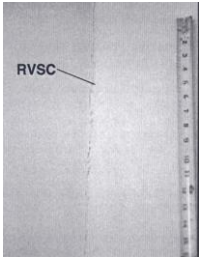
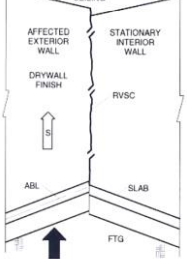
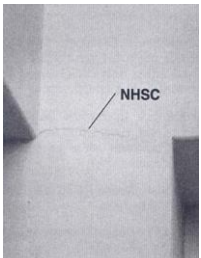
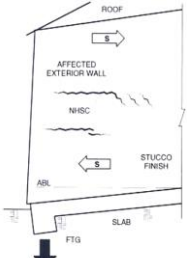
جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری برگرفته از (Audell 2006)

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
NVTC-1 ترک کششی قائم نرمال - نوع ۱	امتداد خطی؛ بسته‌شدگی نزولی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به پایین پی، با RVTC-2 تفاوت دارد	در دیوارهای اندودکاری شده بیرونی رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز رایج است؛ در بخش‌های بالایی و میانی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ درزهای اجرایی صفحات گچی داخلی ممکن است محل ترک خوردگی را کنترل کنند	 
NVTC-2 ترک کششی قائم نرمال - نوع ۲	امتداد خطی؛ بسته‌شدگی صعودی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به پایین پی، با RVTC- 1 تفاوت دارد	در دیوارهای اندودکاری شده بیرونی رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز رایج است؛ در بخش‌های پایینی و میانی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود	 
RVTC-1 ترک کششی قائم معکوس - نوع ۱	امتداد خطی؛ بسته‌شدگی صعودی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به بالای پی، با NVTC-2 تفاوت دارد	در دیوارهای اندودکاری شده بیرونی رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های پایینی و میانی دیوار یافت می‌شود؛ عمدتاً در گوشه‌های قاب پنجره؛ درزهای اجرایی صفحات گچی داخلی ممکن است محل ترک خوردگی را کنترل کنند	 
RVTC-2 ترک کششی قائم معکوس - نوع ۲	امتداد خطی؛ بسته‌شدگی نزولی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به بالای بخش میانی پی، با NVTC1 تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های بالایی و میانی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب پنجره، یافت می‌شود؛ درزهای اجرایی صفحات گچی داخلی ممکن است محل ترک خوردگی را کنترل کنند	 
PVTC ترک کششی قائم ناشی از جداشدگی	امتداد خطی؛ بسته‌شدگی صعودی؛ به دلیل جابه‌جایی جانبی پی، با RVTC-1 و NVTC-2 تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در دیوارهای خارجی، در بخش‌های گوشه، پایینی و انتهایی دیوار یافت می‌شود؛ در دیوارهای انتهایی داخلی، در محل اتصال آن‌ها به دیوارهای خارجی یافت می‌شود	 

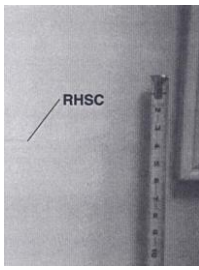
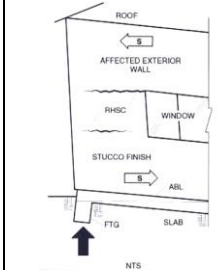
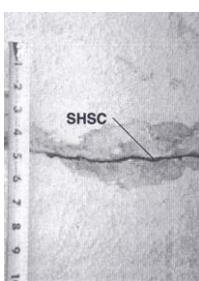
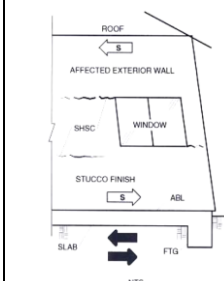
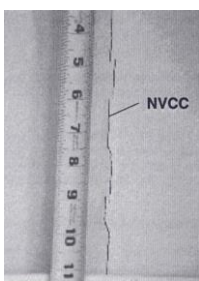
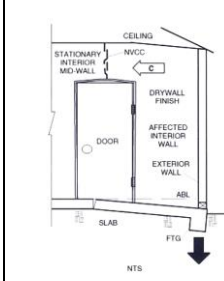
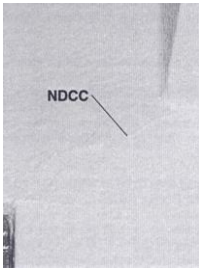
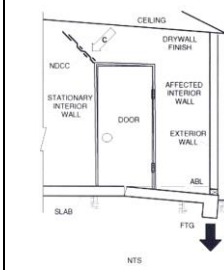
ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
SVTC ترک کششی قائم لرزه‌ای	جداشدگی باز؛ امتداد خطی؛ بلافاصله پس از وقوع زمین‌لرزه مشاهده می‌شود	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز نادر است؛ در بخش‌های میانی و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ درزهای اجرایی صفحات گچی داخلی ممکن است محل ترک خوردگی را کنترل کنند؛ ممکن است بر ترک‌های موجود NVTC-1, NVTC-2, RVTC-1 و RVSC همپوشانی داشته باشد	 
NDTC ترک کششی قطری نرمال	راستای قطری؛ به دلیل جابه‌جایی رو به پایین پی، با RDTC تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز رایج است؛ در بخش‌های گوشه و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ در بخش‌های میانی دیوار نادر است؛ ممکن است در انتهای NHSC تشکیل شود	 
RDTC ترک کششی قطری معکوس	راستای قطری؛ به دلیل جابه‌جایی رو به بالای پی، با NDTC تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های گوشه و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ در بخش‌های میانی دیوار نادر است؛ ممکن است در انتهای RHSC تشکیل شود	 
SDTC ترک کششی قطری لرزه‌ای	الگوی پلکانی؛ بلافاصله پس از وقوع زمین‌لرزه مشاهده می‌شود	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده و بنایی نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز نادر است؛ در بخش‌های میانی دیوار یافت می‌شود؛ درزهای ملات، محل ترک‌ها را در دیوارهای بنایی کنترل می‌کنند؛ ممکن است بر ترک‌های موجود NDTC و RDTC همپوشانی داشته باشد	 

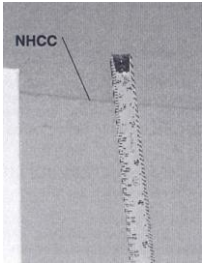
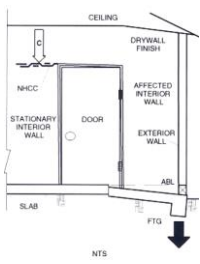
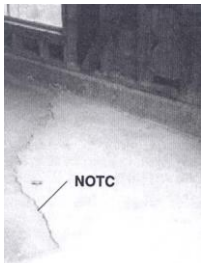
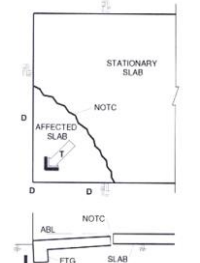
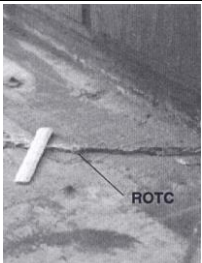
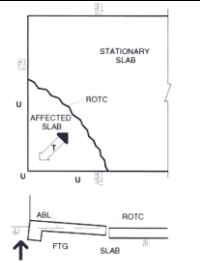
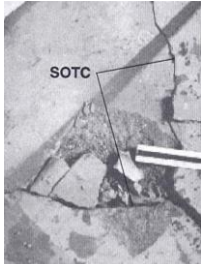
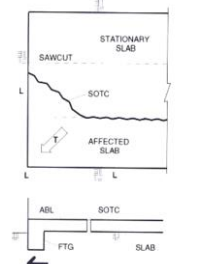
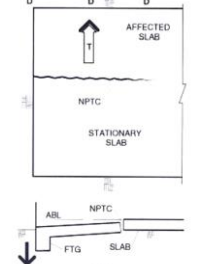
ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
NHTC ترک کششی افقی نرمال	بازشدگی باز؛ امتداد خطی	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های گوشه و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره و اتصالات ستون و تیر در محل اتصال به دیوارهای خارجی، یافت می‌شود؛ درزهای افقی صفحات گچی در دیوارهای داخلی ممکن است محل ترک خوردگی را کنترل کنند	 
NVSC ترک برشی قائم نرمال	الگوهای پلکانی و برآمده	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های انتهایی دیوار، عمدتاً در محل تقاطع دیوارهای داخلی که به دیوارهای خارجی متصل می‌شوند، یافت می‌شود؛ در صفحات گچی ممکن است در امتداد طول ترک، الگوهای پلکانی ریزمقیاس فراوان یا الگوی برآمده مشاهده شود	 
RVSC ترک برشی قائم معکوس	الگوهای پلکانی و برآمده	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های انتهایی دیوار، عمدتاً در محل تقاطع دیوارهای داخلی متصل به دیوارهای خارجی، یافت می‌شود؛ در صفحات گچی ممکن است در امتداد طول ترک، پلکان‌های ریزمقیاس فراوان یا الگوی برآمده مشاهده شود	 
NHSC ترک برشی افقی نرمال	الگوی دندان‌اره‌ای در نمای اندودکاری شده و الگوی پلکانی در صفحات گچی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به پایین پی، با RHSC تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده رایج و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های بالایی، میانی، پایینی، گوشه‌ای و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ ممکن است در انتهای NDTC تشکیل شود	 

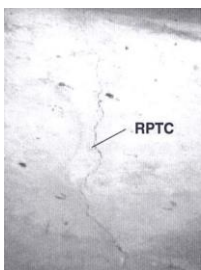
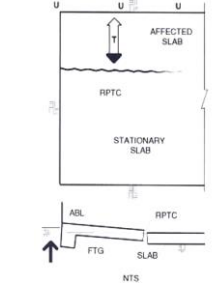
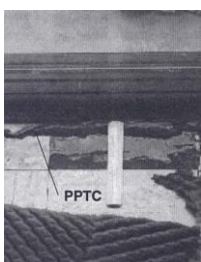
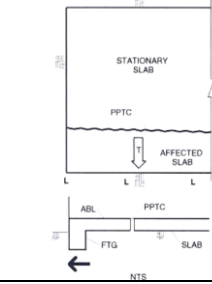
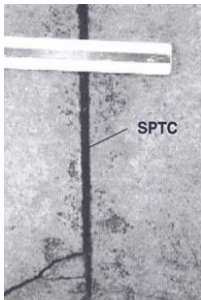
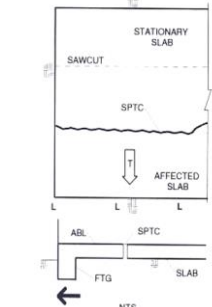
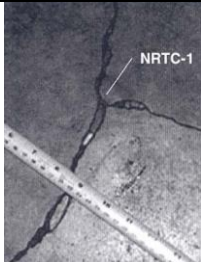
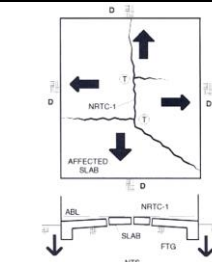
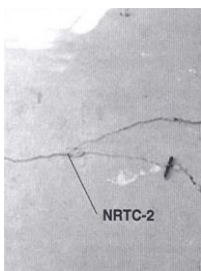
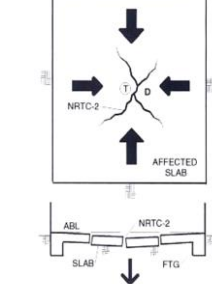
ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
RHSC ترک برشی افقی معکوس	الگوی دندانه‌اره‌ای در نمای اندودکاری شده و الگوی پلکانی در صفحات گچی؛ به دلیل جابه‌جایی رو به بالای پی، با NHSC تفاوت دارد	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز نادر است؛ در بخش‌های بالایی، میانی، پایینی، گوشه‌ای و انتهای دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ ممکن است در انتهای RDTC تشکیل شود	 
SHSC ترک برشی افقی لرزه‌ای	امتداد خطی؛ بلافاصله پس از وقوع زمین‌لرزه مشاهده می‌شود	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نیز بسیار نادر است؛ در بخش‌های بالایی، میانی، پایینی و انتهای دیوار، عمدتاً در گوشه‌های قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ ممکن است بر ترک‌های موجود NHSC، NHTC، RHSC و NHCC همپوشانی داشته باشد	 
NVCC ترک فشاری قائم نرمال	الگوی کمانش	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های بالایی و انتهای دیوار، عمدتاً در درزهای اجرایی صفحات گچی بالای قاب‌های در یا پنجره، یافت می‌شود؛ همچنین در محل تقاطع دیوارهای داخلی که به دیوارهای خارجی متصل شده‌اند، مشاهده می‌شود؛ دیوار ممکن است در محل ترک برآمدگی نشان دهد	 
NDCC ترک فشاری قطری نرمال	الگوی کمانش	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های بالایی و انتهای دیوار، عمدتاً در گوشه‌های بالایی قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ دیوار ممکن است در محل ترک برآمدگی نشان دهد	 

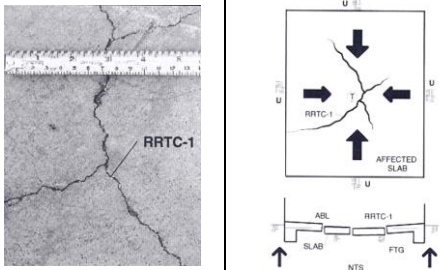
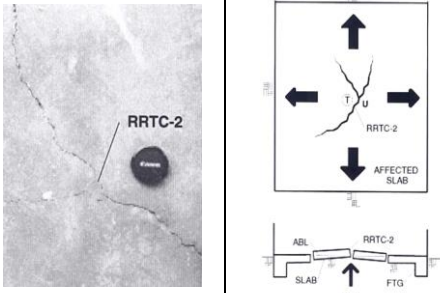
ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
NHCC ترک فشاری افقی نرمال	الگوی کمانش	در دیوارهای خارجی اندودکاری شده بسیار نادر و در دیوارهای داخلی پوشیده شده با صفحات گچی نادر است؛ در بخش‌های بالایی و انتهایی دیوار، عمدتاً در گوشه‌های بالایی قاب در و پنجره، یافت می‌شود؛ همچنین در دیوارهای انتهایی داخلی، در محل اتصال به دیوارهای خارجی، مشاهده می‌شود؛ دیوار ممکن است در محل ترک برآمدگی نشان دهد	 
NOTC ترک کششی مورب با پی نرمال	جهت‌گیری مورب با پی؛ شیب دال متأثر به سمت بیرون ساختمان	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های گوشه دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی خارجی است	 
ROTC ترک کششی مورب با پی معکوس	جهت‌گیری مورب با پی؛ شیب دال متأثر به سمت داخل ساختمان	در دال‌ها نادر است؛ در بخش‌های گوشه دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی داخلی است؛ گاهی جابه‌جایی قائم معکوس در امتداد ترک رخ می‌دهد، جایی که دال متأثر ممکن است روی دال ثابت سوار شود	 
SOTC ترک کششی مورب با پی لرزه‌ای	جهت‌گیری مورب با پی و جدایش موازی در امتداد ترک؛ بلافاصله پس از رخداد زلزله یافت می‌شود	در دال‌ها بسیار نادر است؛ در بخش‌های کناری و گوشه دال یافت می‌شود؛ شیب در عرض دال متأثر ناچیز است؛ ممکن است بر ترک‌های موجود NOTC و ROTC همپوشانی داشته باشد	 
NPTC ترک کششی موازی با پی نرمال	جهت‌گیری موازی با پی؛ شیب دال متأثر به سمت بیرون ساختمان	در دال‌ها بسیار رایج است؛ در بخش‌های میانی و کناری دال یافت می‌شود؛ ممکن است در امتداد درزهای اجرایی رخ دهد؛ شیب دال متأثر به سمت پی خارجی است	 

ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
RPTC ترک کششی موازی با پی معکوس	جهت‌گیری موازی با پی؛ شیب دال متأثر به سمت پی داخلی	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های کناری و میانی دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی داخلی است	 
PPTC ترک کششی موازی با پی ناشی از جداشدگی	جهت‌گیری موازی با پی؛ عمدتاً جابه‌جایی افقی در عرض ترک	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های میانی و کناری دال یافت می‌شود؛ ممکن است در امتداد درزهای اجرایی رخ دهد؛ شیب دال متأثر ناچیز است	 
SPTC ترک کششی موازی با پی لرزه‌ای	جهت‌گیری موازی با پی؛ عمدتاً جابه‌جایی افقی در عرض ترک؛ بلافاصله پس از زلزله یافت می‌شود	در دال‌ها نادر است؛ در بخش‌های میانی و کناری دال یافت می‌شود؛ ممکن است در امتداد درزهای اجرایی رخ دهد؛ شیب دال متأثر ناچیز است؛ ممکن است بر ترک‌های موجود RPTC و NPTC همپوشانی داشته باشد	 
NRTC-1 ترک کششی شعاعی نرمال - نوع ۱	الگوی ترک شعاعی؛ دال گنبدی شکل همراه با شیب دال متأثر به سمت بیرون ساختمان	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های میانی دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی خارجی است	 
NRTC-2 ترک کششی شعاعی نرمال - نوع ۲	الگوی ترک شعاعی؛ دال کاسه‌ای شکل همراه با شیب دال متأثر به سمت داخل ساختمان	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های میانی دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی داخلی است	 

ادامه جدول ۳-۱- طبقه‌بندی ترک‌ها بر اساس مشخصات و الگوی ظاهری

نام ترک	مشخصه‌های متمایز کننده	محل وقوع	طرح و عکس ترک
RRTC-1 ترک کششی شعاعی معکوس - نوع ۱	الگوی ترک شعاعی؛ دال کاسه‌ای شکل همراه با شیب دال متأثر به سمت داخل ساختمان	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های میانی دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی داخلی است	
RRTC-2 ترک کششی شعاعی معکوس - نوع ۲	الگوی ترک شعاعی؛ دال گنبدی شکل همراه با شیب دال متأثر به سمت بیرون ساختمان	در دال‌ها رایج است؛ در بخش‌های میانی دال یافت می‌شود؛ شیب دال متأثر به سمت پی خارجی است	

۳-۵-۶- طبقه‌بندی بر اساس وضعیت فعالیت

ترک‌ها از نظر وضعیت روند تغییرات می‌توانند فعال، غیرفعال یا دارای وضعیت نامشخص باشند. وضعیت فعالیت ترک باید بر اساس مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در یک دوره پایش مشخص و با توجه به تناوب قرائت و دقت ابزار تعیین شود.

ترک فعال، ترکی است که در دوره پایش، تغییر قابل‌اندازه‌گیری در پهنا، طول، جهت، جابه‌جایی نسبی دو سوی ترک یا ایجاد شاخه‌های جدید نشان دهد. باز شدن مجدد ترک پس از ترمیم نیز می‌تواند نشانه‌ای از ادامه یا تکرار عامل ایجادکننده باشد، اما به‌تنهایی معیار قطعی تشخیص فعالیت ترک محسوب نمی‌شود.

ترک غیرفعال، ترکی است که در دوره پایش و با توجه به دقت ابزار اندازه‌گیری، تغییر قابل‌تشخیصی نشان نداده باشد. غیرفعال تشخیص دادن ترک به معنی توقف دائمی تغییرات یا اطمینان از عدم بازشدگی آن در آینده نیست. در صورتی که اطلاعات یا مدت پایش برای تشخیص وضعیت ترک کافی نباشد، وضعیت آن نامشخص در نظر گرفته می‌شود.

وضعیت فعالیت ترک باید مستقل از وضعیت فعالیت فرونشست یا تغییر شکل زمین و حرکت پی یا ساختمان تعیین شود. ممکن است فرونشست یا حرکت زمین ادامه داشته باشد، اما ترک مشخصی تغییر قابل‌اندازه‌گیری نشان ندهد. همچنین ممکن است ترک در اثر تغییرات حرارتی، رطوبتی، بارگذاری یا سایر عوامل، بدون ارتباط مستقیم با ادامه حرکت زمین، فعال باشد. نحوه تفکیک این وضعیت‌ها در بند ۳-۷ ارائه شده است.

۳-۶- الگوهای آسیب در سیستم‌های مختلف

۳-۶-۱- ساختمان‌های بنایی

ساختمان‌های بنایی به دلیل مقاومت کششی محدود و رفتار نسبتاً ترد دیوارها، می‌توانند نسبت به نشست تفاضلی و اعوجاج حساس باشند.

مودهای محتمل آسیب عبارت‌اند از:

الف) ترک قطری یا ترک پله‌ای:

این ترک‌ها می‌توانند از گوشه بازشوها شروع شوند یا در امتداد بندهای ملات گسترش یابند و با تغییر شکل برشی یا نشست تفاضلی سازگار باشند.

ب) خرابی داخل یا خارج از صفحه دیوار:

در خرابی داخل صفحه دیوار، نشست تفاضلی ممکن است دیوار را در امتداد طول یا ارتفاع دچار خمش کند. محل ترک به شکل تغییر شکل، پیوستگی سقف و وضعیت تکیه‌گاهی وابسته است.

در خرابی خارج صفحه دیوار، جداسازی دیوار از سقف، کف یا دیوار متقاطع می‌تواند مقاومت خارج از صفحه آن را کاهش دهد و احتمال برآمدگی یا واژگونی موضعی را افزایش دهد.

پ) ترک کششی قائم:

کرنش کششی یا بازشدگی میان دو بخش ساختمان ممکن است با ترک‌های قائم یا نزدیک به قائم همراه شود.

ت) خردشدگی و لهیدگی:

تمرکز فشار در پای دیوار، اطراف تکیه‌گاه‌ها یا گوشه‌ها می‌تواند به خردشدگی مصالح بنایی منجر شود.

ث) جداسازی اجزا:

باز شدن اتصال ضعیف بین دیوار و سقف، دیوارهای متقاطع یا دیوار و کلاف می‌تواند بر یکپارچگی ساختمان اثر بگذارد.

۳-۶-۲- سازه‌های بتن‌آرمه

قاب‌ها و دیوارهای بتن‌آرمه ممکن است بخشی از تغییر شکل‌های تحمیلی را از طریق ترک‌خوردگی و باز توزیع نیرو تحمل کنند. میزان این توانایی به شکل‌پذیری، جزئیات آرماتور گذاری، کیفیت اجرا، پیوستگی سازه و وضعیت مصالح وابسته است.

آسیب‌های محتمل می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

الف) ترک‌های خمشی در تیرها و دال‌ها:

نشست تکیه‌گاه‌ها می‌تواند محل و مقدار لنگرها را تغییر دهد و موجب ایجاد ترک در نواحی متفاوت از الگوی معمول بارگذاری شود که در طراحی اولیه انتظار ترک شدید در آن‌ها وجود نداشته است.

(ب) ترک‌های برشی:

تغییر شکل تحمیلی ممکن است تقاضای برشی تیر، ستون یا دیوار را افزایش دهد و با ترک‌های مایل همراه شود.

(پ) آسیب ستون‌ها:

کج شدگی و خروج از مرکزیت ناشی از نشست یک یا چند تکیه‌گاه می‌تواند لنگر ثانویه و نیروی محوری ستون را تغییر دهد. ترک، تغییر شکل یا آسیب اتصال ستون به پی می‌تواند نیازمند بررسی باشد.

(ت) آسیب شالوده و کلاف‌ها:

ترک شالوده، جداشدگی کف از ستون، نشست موضعی اطراف پی و تغییر تراز شناژها می‌تواند از نشانه‌های تغییر شکل موضعی یا نشست تفاضلی پی باشد.

۳-۶-۳ - سازه‌های فولادی

سازه‌های فولادی، در صورت برخورداری از طراحی و اجرای مناسب، می‌توانند ظرفیت شکل قابل‌توجهی داشته باشند؛ با این حال، نشست تفاضلی ممکن است باعث تمرکز آسیب در اعضای لاغر، اتصالات، مهاربندها و صفحات پایه شود. مودهای محتمل آسیب عبارت‌اند از:

(الف) آسیب اتصالات:

نشست تفاضلی می‌تواند باعث دوران یا جابه‌جایی اضافی در گره‌ها شود. این وضعیت ممکن است به لغزش پیچ‌ها، لهیدگی سوراخ پیچ، تغییر شکل ورق اتصال، ترک جوش یا پارگی موضعی ورق‌های اتصال منجر شود.

(ب) کمانش موضعی:

لنگرها و نیروهای اضافی ناشی از نشست می‌توانند بال یا جان تیرها را در ناحیه فشاری مستعد کمانش موضعی کنند.

(پ) خروج ستون از شاقول:

در ستون‌ها نیز نشست نامتقارن می‌تواند باعث خروج از شاقول، افزایش آثار مرتبه دوم و کج شدگی ستون شود.

(ت) تغییر نیروی مهاربندها:

تغییر هندسه دهانه می‌تواند در مهاربندها نیروی اضافی ایجاد کند و موجب کمانش، تسلیم یا آسیب اتصال شود.

۳-۶-۴ - پی

آسیب پی ممکن است منشأ اولیه آسیب ساختمان باشد یا در اثر تغییر شکل زمین تشدید شود. بررسی پی می‌تواند شامل نوع شالوده، پیوستگی، وضعیت تماس با خاک و آسیب مصالح باشد.

نشانه‌های قابل بررسی عبارت‌اند از:

- ترک در پی، کلاف یا شناژ؛
- چرخش یا تغییر تراز پی؛
- جداشدگی کف از دیوار یا ستون؛

- نشست موضعی اطراف ستون؛
 - وجود فضای خالی یا کاهش تماس پی و خاک؛
 - اختلاف نشست بین پی‌های مجاور.
- مشاهده ترک در سازه فوقانی بدون بررسی وضعیت پی ممکن است برای تعیین منشأ آسیب کافی نباشد.

۳-۶-۵- اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات

اجزای غیر سازه‌ای ممکن است پیش از اعضای اصلی، آثار تغییر شکل ساختمان را نشان دهند. این اجزا علاوه بر نقش آن‌ها در تشخیص الگوی آسیب، از نظر ایمنی بهره‌برداران نیز اهمیت دارند. آسیب‌های محتمل می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- ترک یا جداشدگی دیوارهای پرکننده؛
- جداشدگی نما و سنگ؛
- شکست یا تحت فشار قرار گرفتن شیشه؛
- لق شدن سقف کاذب و اجزای آویزان؛
- ترک کف‌سازی و کاشی؛
- اعوجاج یا تغییر شکل چهارچوب‌ها و اختلال در باز و بسته شدن درها و پنجره‌ها؛
- شکست یا بازشدگی اتصالات لوله‌ها؛
- تغییر شیب خطوط فاضلاب؛
- نشست آب، گاز یا سایر سیالات؛
- کشیدگی کابل‌ها و اتصالات.

۳-۷-۷- تشخیص روند تغییرات

۳-۷-۱- تفکیک مفاهیم فعالیت

- در ارزیابی روند تغییرات، مناسب است وضعیت‌های زیر به‌صورت جداگانه ثبت شوند:
- الف) فعال بودن فرونشست یا تغییر شکل زمین: به معنی ادامه تغییر تراز، شیب یا کرنش زمین در محدوده مورد بررسی است.
- ب) فعال بودن حرکت پی یا ساختمان: به معنی ادامه نشست، کج شدگی، اعوجاج یا جابه‌جایی ساختمان است.
- پ) فعال بودن ترک: به معنی تغییر قابل اندازه‌گیری در پهنا، طول، جهت، جابه‌جایی دو طرف ترک یا ایجاد شاخه‌های جدید است.

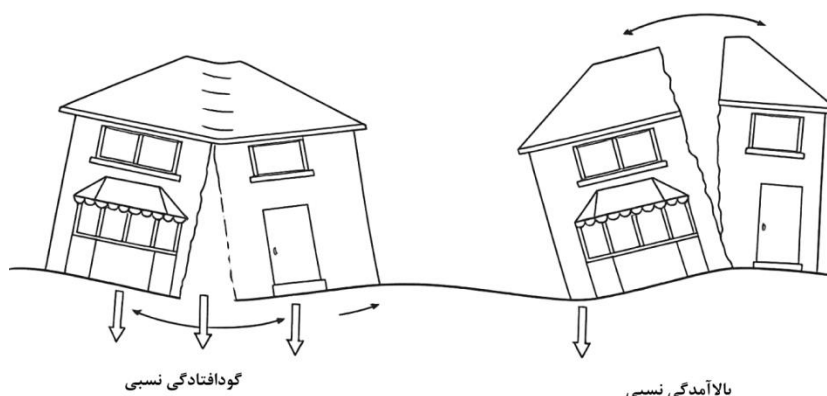
ممکن است یکی از وضعیت‌های یادشده فعال و وضعیت دیگر غیرفعال باشد. برای مثال، فرونشست منطقه‌ای ممکن است ادامه داشته باشد، ولی به دلیل حرکت تقریباً یکنواخت ساختمان، ترک مشخصی تغییر محسوسی نشان ندهد. در این راهنما، «غیرفعال» به وضعیتی اطلاق می‌شود که در یک دوره پایش مشخص و با توجه به تناوب اندازه‌گیری و دقت ابزار، تغییر قابل‌تشخیصی مشاهده نشده باشد. غیرفعال تشخیص دادن زمین، پی، ساختمان یا ترک، به معنی توقف دائمی تغییرات نیست و فقط به دوره و دقت پایش انجام‌شده مربوط است.

۳-۸- ارتباط الگوی آسیب با پروفیل تغییر شکل

تحلیل توزیع ترک‌ها در کل ساختمان می‌تواند به ارائه فرضیه‌ای اولیه درباره شکل تغییر شکل کمک کند. با این حال، الگوی ترک به‌تنهایی برای تعیین قطعی پروفیل زمین یا پی کافی نیست و باید با اندازه‌گیری تراز، کج شدگی، وضعیت شالوده و داده‌های پایش کنترل شود.

۳-۸-۱- تغییر شکل مقعر و محدب

نشست غیریکنواخت پی می‌تواند به دو حالت کلی گودافتادگی نسبی (sag) و بالاآمدگی نسبی (hog) ظاهر شود. در حالتی که نشست در دو طرف دیوار بیشتر از بخش میانی باشد، وسط دیوار به‌صورت نسبی بالاتر قرار می‌گیرد و تغییر شکل مقعر یا گودافتادگی ایجاد می‌شود. برعکس، اگر بخش میانی نسبت به دو طرف بالاتر قرار گیرد، تغییر شکل محدب یا بالاآمدگی نسبی به وجود می‌آید. این تغییر شکل‌ها که از آن‌ها با عنوان تغییر مکان نسبی نیز یاد می‌شود، باعث ایجاد نیروهای کششی افقی در دیوار شده و در نتیجه ترک‌های قائم در بخش‌های مختلف ساختمان ظاهر می‌شوند. الگوی ترک‌خوردگی به نوع تغییر شکل بستگی دارد. در حالت بالاآمدگی نسبی، ترک‌ها معمولاً ابتدا در بالای دیوار ظاهر می‌شوند و با افزایش تغییر شکل، گسترش می‌یابند. در حالت گودافتادگی نسبی، ترک‌ها معمولاً از پایین دیوار آغاز می‌شوند و با ادامه نشست، توسعه پیدا می‌کنند؛ بنابراین، افزایش تحدب یا تقعر پی می‌تواند به ادامه و تشدید ترک‌خوردگی در دیوار منجر شود. شدت اثر این پدیده نیز به طول دیوار و میزان تغییر شکل بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۳-۱۳) دیده می‌شود، گودافتادگی و بالاآمدگی نسبی پی می‌توانند الگوهای متفاوتی از ترک‌خوردگی را در دیوار ایجاد کنند.



شکل ۳-۱۳- الگوی ترک خوردگی ناشی از تغییر شکل مقعر و محدب پی (گودافتادگی و بالآمدگی نسبی)

۳-۸-۲- غلبه کرنش کششی

در صورت غلبه کرنش کششی افقی، ترک‌هایی تقریباً عمود بر راستای کشش می‌توانند در بخش‌های مختلف ساختمان ایجاد شوند. تکرار ترک‌های قائم در چند دیوار، بازشدگی درزها و جداشدگی میان دو بخش ساختمانی می‌تواند با این وضعیت سازگار باشد.

برای تقویت این فرضیه، مناسب است جهت و مقدار تغییر فاصله نقاط، بازشدگی درزهای اجرایی، جداشدگی بین دو بخش ساختمان و ایجاد ترک‌های قائم در دیوارهای طبقه همکف بررسی شود.

۳-۸-۳- غلبه کرنش فشاری

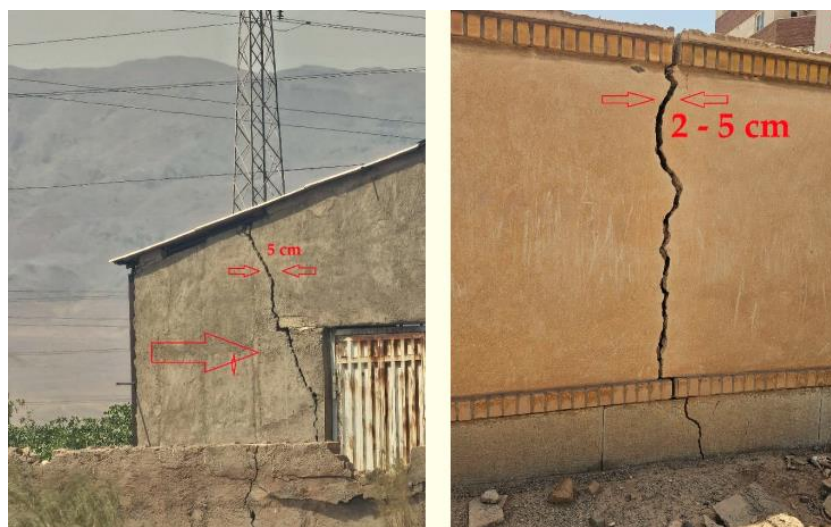
در نواحی فشاری، بسته شدن درزها، برآمدگی دیوار، خردشدگی مصالح یا ناپایداری خارج از صفحه اجزای لاغر ممکن است مشاهده شود. همراهی این نشانه‌ها با کاهش فاصله نقاط، تغییر شکل پی و تمرکز آسیب در پای دیوارها می‌تواند احتمال اثر کرنش فشاری را افزایش دهد.

۳-۹- نمونه‌های عینی از ترک‌های ناشی از فرونشست در مطالعات میدانی

به منظور افزایش کاربردپذیری راهنما و ارائه مصادیق عینی از الگوهای ترک خوردگی ناشی از فرونشست، در این بخش به تعدادی از شواهد صحرایی مستندسازی شده در دشت‌های استان البرز اشاره می‌شود. این مشاهدات میدانی که در قالب مطالعه‌ای جامع در سال ۱۴۰۴ انجام شده است، تطابق نزدیکی بین الگوهای نظری ترک‌ها و رفتار واقعی سازه‌ها و زمین در پهنه‌های دارای فرونشست را نشان می‌دهد. در این مطالعه، شاخص‌های تشخیصی متعددی از جمله ترک‌های کششی و فشاری در سازه‌ها، نشست‌های موضعی زمین، جابه‌جایی و لوله زایی در دهانه چاه‌ها و انحراف تیرهای برق به‌صورت سیستماتیک ثبت و مستندسازی شده است. در ادامه، چند نمونه از این شواهد ارائه می‌شود.

۳-۹-۱- ترک‌های قطری و پله‌ای در دیوارهای بنایی

شکل (۳-۱۴) نمونه‌ای از ترک‌خوردگی در دیوار ساختمان‌های آموزشی و صنعتی در شهر اشتهارد را نشان می‌دهد. الگوی ترک‌ها عمدتاً به صورت قطری و پله‌ای بوده و در ساختمان‌های قدیمی فاقد پی عمیق مشاهده شده است. این الگو با ترک‌های ناشی از نشست غیریکنواخت و تغییر شکل برشی در دیوارهای بنایی (مطابق با بندهای ۳-۵-۴ و ۳-۶-۱) همخوانی کامل دارد. در این موارد، تمرکز ترک‌ها در اطراف بازشوها و محل اتصال دیوارهای متقاطع، بیانگر توزیع نامناسب تنش در اثر تغییر شکل تکیه‌گاه‌ها است.



شکل ۳-۱۴- نمونه‌ای از ترک‌خوردگی در ساختمان‌های آموزشی و صنعتی در اثر فرونشست زمین در منطقه اشتهارد

۳-۹-۲- ترک‌خوردگی در پی و دیوار ساختمان‌ها

شکل (۳-۱۵) نمونه‌ای از ترک‌خوردگی هم‌زمان در دیوار و پی یک ساختمان بنایی قدیمی و یک بنای جدید ساز در دشت هشتگرد را نشان می‌دهد. در این نمونه، نشست تفاضلی ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی، موجب بروز ترک‌های مورب در دیوار باربر و همچنین جداشدگی و ترک در شالوده شده است. این تصویر به خوبی نشان می‌دهد که در ساختمان‌های واقع در پهنه‌های فرونشست، صرفاً ترمیم ترک‌های فوقانی بدون بررسی و بهسازی پی (مطابق با بند ۴-۴) پاسخگو نخواهد بود.



شکل ۳-۱۵- ترک خوردگی در دیوار بنای جدید ساز و دیوار و پی بنای قدیمی در اثر برداشت آب زیرزمینی در دشت هشتگرد

نمونه‌های ارائه شده در این بخش نشان می‌دهند که فرونشست و تغییر شکل غیریکنواخت زمین می‌تواند در ساختمان‌ها به صورت ترک خوردگی دیوارها، بازشدگی و جداشدگی اجزای ساختمان و سایر تغییر شکل‌های قابل مشاهده ظاهر شود. این شواهد می‌توانند به عنوان نمونه‌های عینی برای مقایسه با الگوهای آسیب تشریح شده در این فصل و کمک به مستندسازی و ارزیابی اولیه ساختمان مورد استفاده قرار گیرند.

با این حال، مشاهده یک الگوی ترک به تنهایی برای انتساب قطعی آن به فرونشست کافی نیست. ترک‌های مشابه ممکن است در اثر نشست موضعی، تغییرات رطوبتی، تغییرات حرارتی، جمع شدگی مصالح، ضعف اتصال، تغییرات بارگذاری، حفاری‌های مجاور یا سایر عوامل ژئوتکنیکی و سازه‌ای نیز ایجاد شوند. بنابراین، تشخیص منشأ آسیب باید با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از شواهد شامل الگوی ترک، وضعیت پی و زمین، تغییر شکل ساختمان، شرایط سازه‌ای و روند زمانی گسترش آسیب انجام شود. این موضوع اهمیت بررسی شرایط محلی و پرهیز از نسبت دادن هر ترک ساختمانی به فرونشست را نشان می‌دهد.

تذکر: شواهد صحرایی ارائه شده، صرفاً برای تکمیل جنبه آموزشی و مصداق یابی مطالب نظری راهنما درج شده‌اند و نمی‌توان از آن‌ها برای استنتاج کمی نرخ فرونشست یا تعیین سطح خرابی ساختمان‌های مشابه بدون انجام بررسی‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های محلی استفاده کرد. تشخیص نهایی منشأ و شدت آسیب در هر پروژه، همواره نیازمند برداشت میدانی، اندازه‌گیری‌های کمی و تحلیل‌های تخصصی مطابق با چارچوب این راهنما است.

۳-۱۰- ارزیابی مرحله‌ای، تعیین رده خرابی و انتخاب اولیه راهبرد مداخله

ارزیابی ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست با هدف شناسایی نوع و گستره آسیب، بررسی منشأهای محتمل آن، تعیین وضعیت روند تغییرات و انتخاب سطح مناسب بررسی انجام می‌شود. این ارزیابی در سه سطح تنظیم شده است تا ساختمان‌های فاقد آسیب قابل توجه یا دارای آسیب محدود، بدون ضرورت وارد مطالعات تفصیلی نشوند و بررسی‌های تخصصی بر ساختمان‌های دارای آسیب مهم، تغییر شکل پیش‌رونده یا منشأ نامشخص متمرکز شود. عبور از یک سطح ارزیابی به سطح بالاتر بر اساس مجموعه شواهد موجود انجام می‌شود و نباید تنها بر یک شاخص، مانند پهنای ترک، شکل ظاهری ترک یا قرارگیری ساختمان در پهنه فرونشست متکی باشد. چک‌لیست‌ها و فرم‌های مربوط به هر سطح در پیوست (الف) ارائه شده‌اند.

۳-۱۰-۱- سطح اول ارزیابی: غربالگری سریع

سطح اول با هدف شناسایی اولیه نشانه‌های قابل مشاهده آسیب و تعیین نیاز به بررسی بیشتر انجام می‌شود. این سطح عمدتاً بر بازدید چشمی، اطلاعات اولیه بهره‌برداری و گزارش ساکنان یا مسئولان نگهداری ساختمان استوار است. در این مرحله، مواردی مانند وجود ترک، اختلال در عملکرد درها و پنجره‌ها، اختلاف تراز یا شیب کف، کج شدگی دیوارها یا ستون‌ها، تغییر شکل محوطه پیرامونی، آسیب تأسیسات و گزارش افزایش آسیب در طول زمان بررسی می‌شوند.

در صورتی که نشانه قابل توجهی از آسیب مشاهده یا گزارش نشود، ارزیابی می‌تواند در همین سطح متوقف شود و پایش دوره‌ای متناسب با شرایط ساختمان و پهنه فرونشست مورد توجه قرار گیرد. در صورت مشاهده حداقل یک نشانه نیازمند بررسی بیشتر، وجود چند نشانه خفیف، گزارش افزایش ترک یا تغییر شکل، یا نامشخص بودن وضعیت ساختمان، ارزیابی به سطح دوم توسعه می‌یابد.

۳-۱۰-۲- سطح دوم ارزیابی: ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب

در سطح دوم، نوع، محل، گستره و ویژگی‌های آسیب با دقت بیشتری ثبت می‌شود. در این مرحله، مشخصات ترک‌ها، عضو یا جزء درگیر، وضعیت بهره‌برداری، وجود علائم همراه و احتمال ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اطلاعات قابل بررسی در این سطح می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- (الف) محل، جهت، طول، پهنای و عمق ترک؛
- (ب) نقش سازه‌ای یا غیر سازه‌ای جزء آسیب‌دیده؛
- (پ) وجود جابه‌جایی نسبی دو سوی ترک؛
- (ت) وجود خوردشدگی، لهیدگی، پوسته شدگی یا کماتش؛

ث) وجود نشست کف، اختلاف تراز، کج شدگی یا اعوجاج؛

ج) اختلال در عملکرد درها، پنجره‌ها و تأسیسات؛

چ) شواهد مربوط به افزایش پهنای یا طول ترک، ایجاد شاخه‌های جدید یا تغییر شکل در طول زمان؛

ح) احتمال ارتباط آسیب با فرونشست منطقه‌ای، نشست موضعی، نشست آب، گودبرداری، تغییر بارگذاری، ضعف اجرا یا سایر عوامل محتمل.

در صورتی که آسیب محدود به اجزای غیر سازه‌ای باشد، منشأ آن با اطمینان کافی مشخص شود، شواهدی از ارتباط آن با حرکت زمین، پی یا سازه وجود نداشته باشد و ایمنی بهره‌برداران تحت تأثیر قرار نگیرد، ارزیابی می‌تواند در سطح دوم ادامه یابد. در چنین شرایطی، ترمیم موضعی و پایش دوره‌ای می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

فعال بودن ترک در یک جزء غیر سازه‌ای، به‌تنهایی موجب ارجاع ساختمان به سطح سوم نمی‌شود. با این حال، در صورت افزایش قابل‌اندازه‌گیری پهنای یا طول ترک، ایجاد شاخه جدید، بروز جابه‌جایی نسبی دو سوی ترک یا مشاهده نشانه‌های مرتبط با حرکت زمین، پی یا سازه، ارزیابی به سطح سوم توسعه می‌یابد.

۳-۱۰-۳ - سطح سوم ارزیابی: ارزیابی تفصیلی تخصصی

ارزیابی تفصیلی تخصصی در شرایطی مورد توجه قرار می‌گیرد که بررسی‌های سطح اول و دوم برای تعیین منشأ، شدت یا پیامدهای آسیب کافی نباشند یا شواهدی از آسیب مهم در زمین، پی یا سیستم باربر ساختمان وجود داشته باشد.

ارجاع ساختمان به سطح سوم می‌تواند در شرایط زیر ضرورت داشته باشد:

الف) مشاهده آسیب در پی، شالوده، کلاف‌ها یا اعضای باربر اصلی؛

ب) قرارگیری آسیب در رده متوسط یا بالاتر؛

پ) وجود نشست، کج شدگی، اعوجاج یا جابه‌جایی پیش‌رونده ساختمان؛

ت) مشاهده ترک فعال در عضو باربر؛

ث) نامشخص بودن منشأ ترک فعال یا تغییر شکل ساختمان؛

ج) وجود احتمال ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سیستم سازه‌ای؛

چ) وجود علائمی مانند خردشدگی، لهیدگی، کمزش، جداشدگی، جابه‌جایی نسبی، کاهش ظرفیت باربری یا ناپایداری؛

ح) تأثیر آسیب بر ایمنی بهره‌برداران یا پایداری اجزای ساختمان؛

خ) اهمیت یا حساسیت ویژه ساختمان از نظر کاربری، جمعیت بهره‌بردار یا پیامد خرابی.

در سطح سوم، ارزیابی می‌تواند به‌صورت هماهنگ در سه بخش زمین و محیط پیرامونی، پی و شالوده و سازه و اجزای غیر سازه‌ای انجام شود. دامنه بررسی هر بخش متناسب با نوع ساختمان، شواهد موجود، سطح خطر و عدم قطعیت‌های ارزیابی تعیین می‌شود.

این ارزیابی می‌تواند حسب شرایط پروژه با مشارکت تخصص‌های سازه، ژئوتکنیک، زمین‌شناسی، نقشه‌برداری، معماری و تأسیسات انجام شود.

۳-۱۰-۴- تعیین رده پایه خرابی

۳-۱۰-۴-۱- تعیین رده خرابی بر اساس مشاهدات میدانی

برای تعیین رده پایه خرابی، شاخص‌های کمی قابل اعمال، شامل پهنای ترک، دوران نسبی و کرنش افقی، با حدود ارائه‌شده در جدول (۲-۳) مقایسه می‌شوند.

پیش از استفاده از این شاخص‌ها، مناسب است نوع سیستم سازه‌ای، محل آسیب، نقش عضو آسیب‌دیده و سازوکار محتمل خرابی مشخص شود. شاخص پهنای ترک باید متناسب با نوع مصالح و نقش جزء تفسیر شود و به‌تنهایی مبنای تعیین رده خرابی کل ساختمان قرار نگیرد.

در صورتی که نتایج شاخص‌های کمی در رده‌های متفاوت قرار گیرند، شدیدترین رده قابل اعمال به‌عنوان رده پایه خرابی در نظر گرفته می‌شود.

اگر یکی از شاخص‌ها به دلیل نبود اطلاعات، نبود طول مبنای مناسب یا محدودیت اندازه‌گیری قابل تعیین نباشد، رده پایه بر اساس سایر شاخص‌های معتبر و شواهد موجود تعیین می‌شود و محدودیت اطلاعات در گزارش ارزیابی ثبت می‌گردد.

جدول ۳-۲- ماتریس تعیین رده پایه آسیب و انتخاب اولیه راهبرد مداخله برگرفته و تطبیق یافته از (Burland et al., 1995) BRE 251

(Boscardin and Cording (1989 و Day and Boone (1998) al., (1977)

رده خرابی	سطح آسیب	پهنای ترک	دوران نسبی	کرنش افقی
ناچیز	بدون آسیب	کمتر از ۰/۱ میلی‌متر	کمتر از ۱/۳۰۰	کمتر از ۰/۰۵ درصد
بسیار جزئی	معماری یا زیبایی‌شناختی	۰/۱ تا ۱ میلی‌متر	۱/۳۰۰ تا ۱/۲۴۰	۰/۰۵ تا ۰/۰۷۵ درصد
جزئی	معماری / سرویس‌دهی	۱ تا ۵ میلی‌متر	۱/۲۴۰ تا ۱/۱۷۵	۰/۰۷۵ تا ۰/۱۵ درصد
متوسط	سرویس‌دهی	۵ تا ۱۵ میلی‌متر	۱/۱۷۵ تا ۱/۱۲۰	۰/۱۵ تا ۰/۳ درصد
شدید	سازه‌ای	۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر	۱/۱۲۰ تا ۱/۷۰	بیشتر از ۰/۳ درصد
بسیار شدید	سازه‌ای با خطر ریزش	بیشتر از ۲۵ میلی‌متر	بیشتر از ۱/۷۰	

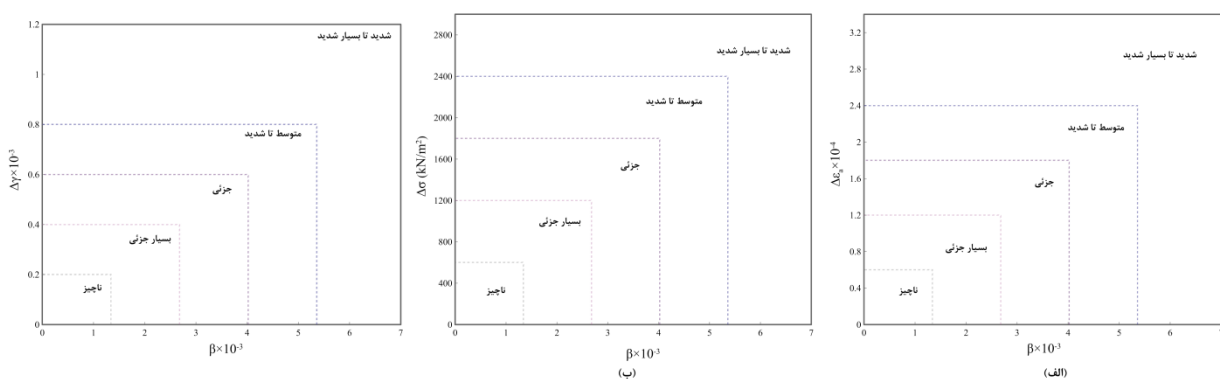
۳-۱۰-۴-۲- تعیین رده خرابی بر اساس مدل‌سازی عددی

در ساختمان‌هایی که به‌منظور بررسی پاسخ ساختمان، مدل‌سازی عددی انجام می‌شود، می‌توان علاوه بر شاخص‌های حاصل از برداشت و اندازه‌گیری میدانی، از نتایج تحلیل عددی برای ارزیابی کمی شدت آسیب استفاده کرد. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی می‌تواند علاوه بر تعیین میزان تغییر شکل زمین، برای ارزیابی پاسخ ساختمان و تعیین سطح آسیب نیز مورد استفاده قرار گیرند.

در این رویکرد، خروجی‌های مدل عددی در محل ساختمان شامل پارامترهایی نظیر دوران نسبی (β)، کرنش برشی دیوارهای میانقابی ($\Delta\gamma$)، کرنش محوری ستون‌ها (ϵ_a) و تنش محوری ستون‌ها ($\Delta\sigma$) استخراج شده و حداکثر رده خرابی مطابق شکل (۳-۱۶) تعیین می‌گردد. مطابق این شکل‌ها با به دست آوردن مقادیر دوران نسبی و نقاط متناظر با مقادیر کرنش برشی دیوارهای میانقابی، کرنش محوری ستون‌ها و تنش محوری ستون‌ها می‌توان به ارزیابی میزان خسارت پرداخت. به این ترتیب، نتایج مدل‌سازی عددی می‌توانند از یک مقدار صرفاً تغییر شکل زمین به یک معیار قابل استفاده برای قضاوت مهندسی درباره وضعیت ساختمان تبدیل شوند. حد نهایی پارامترهای سطوح آسیب با توجه به ضوابط آیین‌نامه‌ای مطابق جدول (۳-۳) تعیین می‌گردد.

در صورت تفاوت نتایج حاصل از شاخص‌های عددی و مشاهدات میدانی، موضوع باید از نظر فرضیات مدل، کیفیت داده‌های ورودی، سازوکار خرابی و شرایط واقعی ساختمان بررسی شود و تصمیم نهایی بر اساس مجموعه شواهد و قضاوت مهندسی اتخاذ گردد.

تذکر: مدل‌سازی عددی جایگزین بازدید و اندازه‌گیری ساختمان نیست و نتایج آن باید تا حد امکان با داده‌های میدانی و پایش ساختمان کنترل و تفسیر شوند.



شکل ۳-۱۶- نمودارهای تعیین رده خرابی بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی

جدول ۳-۳- حد نهایی متغیرهای سطوح آسیب

β_{crit} (Skempton and MacDonald, 1956)	1/150
γ_{all} (Boone, 1996)	0.001
ϵ_{cu} (ACI Committee 318, 2014)	0.003
f'_c	30 MPa

۳-۱۰-۵- تعیین رده نهایی خرابی

رده نهایی خرابی پس از کنترل رده پایه با توجه به موارد زیر تعیین می‌شود:

(الف) نوع و اهمیت عضو آسیب‌دیده؛

(ب) سازه‌ای یا غیر سازه‌ای بودن جزء؛

(پ) نوع سیستم سازه‌ای؛

(ت) محل و گستره آسیب؛

(ث) سازوکار محتمل خرابی؛

(ج) وجود علائم همراه، مانند خردشدگی، لهیدگی، کمانش، پوسته شدگی، جداشدگی یا جابه‌جایی نسبی؛

(چ) احتمال کاهش ظرفیت، سختی، پایداری یا قابلیت بهره‌برداری؛

(ح) نتایج ارزیابی زمین، پی و سازه.

هرگونه انتخاب رده شدیدتر از رده پایه باید بر شواهد فنی مستند استوار باشد. همچنین، در اجزای غیر سازه‌ای، پهنای ترک به‌تنهایی بیانگر رده خرابی کل ساختمان نیست. در این اجزاء، خطر سقوط یا جداشدگی، اختلال در بهره‌برداری و احتمال ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سازه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

در ارزیابی سطح سوم، بخش بحرانی از میان زمین، پی، سازه و اجزای غیر سازه‌ای شناسایی می‌شود. در صورتی که شاخص‌ها یا بخش‌های مختلف، رده‌های متفاوتی از آسیب را نشان دهند، شدیدترین رده قابل‌اعمال و مستند، مبنای تعیین رده نهایی خرابی قرار می‌گیرد.

۳-۱۰-۶- اثر وضعیت روند تغییرات بر تصمیم‌گیری

وضعیت فعالیت فرونشست یا تغییر شکل زمین، حرکت پی یا ساختمان و ترک‌ها مطابق بند ۳-۷، به‌صورت مستقل و در یکی از حالت‌های فعال، غیرفعال یا نامشخص تعیین و ثبت می‌شود.

فعال بودن فرونشست منطقه‌ای الزاماً به معنی فعال بودن حرکت ساختمان یا ترک نیست. همچنین، فعال بودن ترک به‌تنهایی موجب ارتقای خودکار رده خرابی نمی‌شود. وضعیت فعالیت عمدتاً بر موارد زیر اثر می‌گذارد:

(الف) فوریت انجام اقدامات؛

(ب) تناوب و مدت پایش؛

(پ) زمان و توالی مداخله؛

(ت) نوع مصالح و روش ترمیم؛

(ث) ضرورت طراحی مرحله‌ای یا قابل بازنگری؛

(ج) نیاز به ارزیابی مجدد.

غیرفعال تشخیص دادن زمین، پی، ساختمان یا ترک، تنها به دوره پایش، تناوب اندازه‌گیری و دقت ابزار مربوط است و به معنی توقف دائمی تغییرات نیست.

در صورت افزایش شاخص‌های آسیب، تغییر وضعیت روند یا ظهور علائم جدید، رده خرابی و راهبرد مداخله باید بر اساس شرایط جدید بازنگری شود.

۳-۱۰-۷- انتخاب اولیه راهبرد مداخله

پس از تعیین رده نهایی خرابی و بررسی وضعیت روند تغییرات، راهبردهای اولیه قابل بررسی بر اساس جدول (۳-۳) یا جدول (۳-۳) انتخاب می‌شوند.

راهبرد اولیه می‌تواند حسب شرایط شامل یک یا ترکیبی از اقدامات زیر باشد:

الف) پایش بدون مداخله سازه‌ای؛

ب) ترمیم موضعی اجزای غیر سازه‌ای؛

پ) ترمیم ترک‌های غیرفعال؛

ت) استفاده از درزگیرها یا اتصالات انعطاف‌پذیر؛

ث) پایدارسازی موقت یا محدودسازی بهره‌برداری؛

ج) ارزیابی و مقاومسازی اعضای سازه‌ای؛

چ) بهسازی زمین یا پی؛

ح) یکپارچه‌سازی شالوده؛

خ) اجرای راهبرد ترکیبی برای زمین، پی و سازه؛

د) بررسی خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری در شرایط مقرر در بند ۴-۹.

راهبردهای ارائه‌شده جنبه اولیه دارند و انتخاب نهایی روش مداخله پس از تعیین منشأ آسیب، انجام مطالعات لازم و بررسی گزینه‌های فصل چهارم صورت می‌گیرد.

فصل ۴

روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی

۴-۱- مقدمه

آسیب ساختمان‌های واقع در پهنه‌های دارای فرونشست ممکن است در زمین، پی، اعضای سازه‌ای، اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات ظاهر شود. نوع و گستره مداخله به منشأ یا منشأ‌های محتمل آسیب، وضعیت تغییر شکل زمین و ساختمان، نوع سیستم سازه‌ای، شرایط پی، ظرفیت باقیمانده اعضا، اهمیت ساختمان و محدودیت‌های اجرایی وابسته است. اقدامات مقاومت‌سازی ساختمان لزوماً عامل ایجاد فرونشست منطقه‌ای را متوقف نمی‌کنند. از این‌رو، هدف مداخله ساختمانی می‌تواند شامل کاهش خطر، تأمین یا بهبود پایداری، کنترل تغییر شکل‌های نسبی، کاهش احتمال گسترش آسیب و حفظ یا بازیابی قابلیت بهره‌برداری باشد. انتخاب روش مداخله باید بر اساس نتایج تحلیل آسیب فصل سوم، مطالعات زمین و پی، ارزیابی سازه‌ای و برنامه پایش انجام شود. در صورت ادامه‌دار یا نامشخص بودن روند تغییر شکل، عملکرد روش‌های مورد بررسی می‌تواند تحت سناریوهای محتمل تغییر شکل آینده ارزیابی شود. مباحث این فصل با راهنمای ارزیابی ریسک فرونشست زمین ارتباط موضوعی دارد. این راهنما چارچوب ارزیابی خطر، آسیب‌پذیری، مواجهه و ریسک فرونشست را ارائه می‌کند. مناسب است در پروژه‌های مرتبط، نتایج ارزیابی و انتخاب راهبرد مداخله با آخرین نسخه این راهنماها نیز تطبیق داده شود. در این فصل، اصول انتخاب مداخله، پایدارسازی موقت، راهکارهای بهسازی زمین و پی، مقاومت‌سازی ساختمان‌های بتن‌آرمه، فولادی و اجزای غیر سازه‌ای، ایمن‌سازی اجزای غیر سازه‌ای و شرایط بررسی خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری ارائه می‌شود. الزامات مربوط به توالی اجرا و پایش در فصل پنجم بیان شده است.

۴-۲- اصول انتخاب راهبرد مداخله

در پهنه‌هایی که فرونشست عمدتاً با افت سطح آب زیرزمینی مرتبط است، کنترل افت و مدیریت برداشت از آبخوان، اصلی‌ترین رویکرد کاهش مخاطرات فرونشست محسوب می‌شود. مناسب است میزان برداشت به‌گونه‌ای مدیریت شود که از تشدید فرونشست و ایجاد تغییر شکل‌های آسیب‌زا در ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی جلوگیری شود. با این حال، در شرایطی که به دلایل فنی، اجرایی یا مدیریتی امکان کنترل کامل افت سطح آب زیرزمینی وجود نداشته باشد، بررسی و به‌کارگیری تمهیدات تکمیلی در زمین، پی، سازه و اجزای غیر سازه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. اصول انتخاب این تمهیدات در ادامه این فصل ارائه شده است.

۴-۲-۱- رویکرد کلی

انتخاب راهبرد مداخله می‌تواند با توجه هم‌زمان به موارد زیر انجام شود:

الف) منشأ یا منشأ‌های محتمل آسیب؛

(ب) فعال، غیرفعال یا نامشخص بودن تغییر شکل زمین، پی و ساختمان؛

(پ) نوع، گستره و سطح آسیب تعیین شده در فصل سوم؛

(ت) نوع سیستم سازه‌ای، مصالح و مسیر انتقال بار؛

(ث) نوع، عمق و وضعیت شالوده؛

(ج) شرایط زمین و آب زیرزمینی؛

(چ) تغییر شکل‌های محتمل آینده؛

(ح) اهمیت، کاربری و شرایط بهره‌برداری ساختمان؛

(خ) امکان دسترسی و اجرای عملیات؛

(د) اثر مداخله بر ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور؛

(ذ) قابلیت پایش و کنترل رفتار حین و پس از اجرا؛

(ر) دوام، قابلیت نگهداری و هزینه چرخه عمر مداخله.

راهکار انتخاب شده باید متناسب با عامل کنترل کننده آسیب باشد. برای نمونه، تقویت سازه فوقانی بدون بررسی پی و بستر ممکن است در ساختمانی که آسیب آن عمدتاً ناشی از حرکت تکیه‌گاه‌ها است، به نتیجه مورد انتظار منجر نشود. به همین ترتیب، بهسازی پی بدون بررسی ظرفیت و شکل‌پذیری سازه فوقانی می‌تواند مسیر انتقال بار و توزیع نیروها را تغییر دهد.

۴-۲-۲- ترتیب کلی بررسی گزینه‌ها

بررسی گزینه‌های مداخله می‌تواند در قالب مراحل زیر انجام شود:

- رفع یا کاهش عوامل موضعی قابل کنترل، مانند نشست آب، تخلیه نامناسب رواناب، شسته شدن خاک یا بارگذاری ناخواسته؛
- تأمین ایمنی فوری و پایداری موقت، در صورت وجود خطر؛
- بررسی وضعیت زمین و پی و نیاز به کنترل یا انتقال بار؛
- ارزیابی ظرفیت و تغییر شکل‌پذیری سازه فوقانی؛
- بررسی ایمنی اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات؛
- انتخاب راهبرد ترکیبی و تعیین توالی اجرا؛
- تدوین برنامه کنترل کیفیت، پایش و نگهداری.

این ترتیب یک قاعده ثابت برای همه پروژه‌ها محسوب نمی‌شود و می‌تواند با توجه به شرایط ساختمان تغییر کند.

۴-۲-۳- مداخله در شرایط تغییر شکل فعال یا نامشخص

ادامه‌دار بودن فرونشست یا نشست موضعی می‌تواند بر نوع، زمان اجرا و عملکرد مورد انتظار مداخله اثر بگذارد. در چنین شرایطی، گزینه‌های زیر می‌توانند حسب مورد توجه قرار گیرند:

- کنترل یا رفع عوامل موضعی قابل اصلاح؛
- پایداری موقت و محدودسازی بهره‌برداری؛
- افزایش ظرفیت تحمل تغییر شکل؛
- پیش‌بینی اتصالات و درزهای دارای قابلیت حرکت؛
- طراحی مرحله‌ای و قابل بازنگری؛
- انتخاب راهکاری با امکان بازرسی، تعمیر یا تنظیم مجدد؛
- تداوم پایش در حین و پس از اجرا.

وجود تغییر شکل فعال به تنهایی به معنی غیرممکن بودن مقاومت‌سازی نیست، اما می‌تواند سطح عدم قطعیت و نیاز به پایش و بازنگری را افزایش دهد.

۴-۲-۴- مداخله ترکیبی

در بسیاری از ساختمان‌های آسیب‌دیده، استفاده از یک روش منفرد ممکن است کافی نباشد. برای مثال، بهسازی زمین یا اجرای ریز شمع می‌تواند همراه با تقویت شالوده، اصلاح اتصال پی به سازه و مقاومت‌سازی اعضای فوقانی انجام شود. انتخاب مداخله ترکیبی باید به گونه‌ای باشد که اجزای مختلف پس از اجرا دارای مسیر انتقال بار سازگار باشند و افزایش سختی یا ظرفیت در یک بخش موجب تمرکز نامطلوب نیرو در بخش دیگر نشود.

۴-۲-۵- ارزیابی سازگاری و دوام

در انتخاب روش، سازگاری مصالح جدید و موجود از نظر مقاومت، سختی، چسبندگی، تغییر شکل حرارتی، جمع شدگی، خوردگی، نفوذپذیری و دوام می‌تواند بررسی شود. روش‌هایی که سطح دسترسی به عضو را محدود می‌کنند یا با پوشاندن ترک‌ها امکان پایش را کاهش می‌دهند، بهتر است پس از مستندسازی کامل وضعیت و تعیین ابزارهای جایگزین پایش اجرا شوند.

۴-۲-۶- جایگاه تحلیل‌های عددی در انتخاب راهبرد مداخله

مدل‌سازی عددی یکی از ابزارهای مؤثر برای بررسی رفتار هیدرومکانیکی زمین و تحلیل فرونشست است. در مسائل مرتبط با فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، مدل‌سازی عددی این امکان را فراهم می‌کند که اثر تغییرات فشار آب منفذی، تنش مؤثر، تحکیم و تغییر شکل لایه‌های خاک به صورت هم‌زمان یا متوالی بررسی شود. همچنین، با

استفاده از مدل‌سازی عددی می‌توان اثر ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، هندسه ساختگاه، شرایط مرزی و ویژگی‌های پی و سازه را ارزیابی کرد و از نتایج حاصل برای مقایسه و انتخاب راهبردهای مناسب مداخله استفاده نمود. مدل‌سازی عددی فرونشست را می‌توان به مدل‌های یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی تقسیم کرد. در مدل‌های یک‌بعدی، رفتار یک ستون خاک و عمدتاً تغییر شکل قائم آن در اثر تغییر شرایط بارگذاری یا هیدرولیکی بررسی می‌شود. این نوع مدل‌سازی برای مطالعه اولیه تحکیم، بررسی روند زمانی نشست و تحلیل رفتار لایه‌های تراکم پذیر مناسب است و می‌تواند برای برآورد اولیه میزان و سرعت نشست مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در مدل یک‌بعدی امکان بررسی تغییرات مکانی نشست و اثر هندسه واقعی ساختگاه محدود است.

مدل‌های دوبعدی با در نظر گرفتن تغییرات مکانی در یک مقطع، امکان بررسی توزیع نشست و تغییر شکل در سطح و عمق زمین را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها برای ساختگاه‌هایی که می‌توان رفتار آن‌ها را با یک یا چند مقطع نماینده توصیف کرد، کاربرد زیادی دارند و می‌توانند اثر هندسه زمین، لایه‌بندی خاک، شرایط جریان آب زیرزمینی و حضور اجزایی مانند پی، خاک‌ریز یا سازه را بر پاسخ زمین بررسی کنند. همچنین، در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی، مدل‌های دوبعدی معمولاً به داده‌های هندسی و محاسباتی کمتری نیاز دارند و از نظر زمان و هزینه محاسباتی مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند.

در مقابل، مدل‌های سه‌بعدی زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند که هندسه ساختگاه پیچیده باشد، شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی در جهات مختلف تغییر کند، یا بررسی دقیق اندرکنش زمین، پی و سازه مورد نظر باشد. این مدل‌ها امکان بازنمایی واقع‌بینانه‌تری از تغییرات مکانی نشست و تغییر شکل را فراهم می‌کنند، اما در مقایسه با مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی به داده‌های بیشتری نیاز داشته و هزینه و زمان محاسباتی بالاتری دارند؛ بنابراین، انتخاب ابعاد مدل نباید صرفاً بر اساس افزایش جزئیات هندسی انجام شود، بلکه باید متناسب با هدف تحلیل، هندسه و شرایط ساختگاه، میزان اطلاعات موجود و دقت مورد نیاز صورت گیرد.

از دیدگاه فیزیکی، فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی را می‌توان حاصل اندرکنش میان جریان آب زیرزمینی، تغییر فشار آب منفذی، تنش مؤثر و تحکیم لایه‌های تراکم پذیر دانست. با کاهش سطح آب زیرزمینی، فشار آب منفذی در لایه‌های خاک کاهش یافته و در نتیجه، در شرایط مناسب، تنش مؤثر افزایش می‌یابد. افزایش تنش مؤثر می‌تواند موجب فشردگی و تحکیم لایه‌های تراکم پذیر و در نهایت ایجاد نشست در سطح زمین شود. از آنجا که خروج آب از منافذ و تغییر شکل اسکلت خاک نیز به‌صورت هم‌زمان بر توزیع فشار آب منفذی و میدان تنش اثر می‌گذارد، این فرایند ماهیتی زمانمند و هیدرومکانیکی دارد.

در تحلیل‌های عددی، نحوه در نظر گرفتن این اندرکنش به نوع تحلیل انتخاب‌شده بستگی دارد. در تحلیل تنش-تراوش، ابتدا میدان فشار آب منفذی از تحلیل تراوش به دست آمده و سپس به تحلیل تنش منتقل می‌شود. در این حالت، ارتباط میان دو میدان یک‌طرفه است و تغییرات ایجادشده در تحلیل تنش به‌صورت هم‌زمان به میدان تراوش بازگردانده

نمی‌شود. این رویکرد می‌تواند برای شرایطی مناسب باشد که هدف، بررسی اثر یک میدان فشار آب منفذی مشخص بر وضعیت تنش و تغییر شکل خاک باشد.

در تحلیل تحکیم، تغییرات فشار آب منفذی و تغییر شکل خاک در طول زمان و در نتیجه بارگذاری یا تغییر شرایط هیدرولیکی بررسی می‌شود. این نوع تحلیل برای مطالعه روند زمانی فشردگی لایه‌های تراکم پذیر و برآورد میزان و سرعت نشست اهمیت دارد. با این حال، در مسائل فرونشست ناشی از افت طولانی مدت سطح آب زیرزمینی، لازم است تغییرات شرایط هیدرولیکی و اثر متقابل آن با تغییر شکل خاک متناسب با شرایط واقعی ساختگاه در نظر گرفته شود. در تحلیل کاملاً همبسته تنش-تراوش، میدان تنش و فشار آب منفذی به صورت هم‌زمان و با در نظر گرفتن اندرکنش دوطرفه میان آن‌ها محاسبه می‌شوند. در این رویکرد، کاهش فشار آب منفذی می‌تواند باعث افزایش تنش مؤثر و تغییر شکل خاک شود و تغییر شکل ناشی از فشردگی نیز می‌تواند بر شرایط جریان و فشار آب منفذی اثر بگذارد؛ بنابراین، این نوع تحلیل برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرومکانیکی وابسته به زمان، از جمله فرونشست ناشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی، قابلیت مناسبی دارد.

در نتیجه، انتخاب نوع مدل عددی باید بر اساس هدف تحلیل صورت گیرد. مدل یک‌بعدی می‌تواند برای بررسی اولیه تحکیم و روند زمانی نشست، مدل دوبعدی برای تحلیل تغییرات مکانی در مقاطع نماینده و مدل سه‌بعدی برای شرایط هندسی و هیدروژئولوژیکی پیچیده و بررسی دقیق‌تر اندرکنش زمین-پی-سازه مورد استفاده قرار گیرد. به همین ترتیب، انتخاب نوع تحلیل هیدرومکانیکی نیز باید متناسب با نحوه تغییرات سطح آب زیرزمینی، اهمیت اثرات وابسته به زمان و میزان اهمیت اندرکنش متقابل تنش و تراوش انجام شود.

نرم‌افزارهایی مانند PLAXIS و MIDAS GTS NX از جمله ابزارهای قابل استفاده برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی، تحکیم، تغییر شکل زمین و اندرکنش خاک و سازه هستند. ذکر این نرم‌افزارها صرفاً جنبه نمونه دارد و استفاده از سایر نرم‌افزارهای معتبر دارای قابلیت‌های مشابه نیز امکان‌پذیر است.

نتایج مدل‌سازی عددی، حسب هدف و سطح جزئیات تحلیل، می‌توانند برای استخراج شاخص‌هایی مانند نشست تفاضلی، دوران نسبی، کرنش و تغییرات تنش در اجزای ساختمان مورد استفاده قرار گیرند. تفسیر این شاخص‌ها از نظر شدت و رده آسیب باید مطابق چارچوب ارزیابی ارائه‌شده در بند ۳-۱۰ انجام شود.

۳-۴- پایدارسازی موقت و اقدامات احتیاطی

۳-۴-۱- موارد قابل بررسی

در صورت مشاهده نشانه‌هایی مانند ناپایداری موضعی یا کلی، ترک‌های با رشد سریع، کج شدگی محسوس، افتادگی اعضا، جداشدگی دیوار یا نما، خردشدگی مصالح، آسیب اتصال‌های اصلی یا خطر سقوط اجزا، ممکن است پیش از مداخله دائمی، پایدارسازی موقت ضرورت پیدا کند.

هدف پایدارسازی موقت می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- جلوگیری از ریزش یا گسترش ناپایداری؛
- ایجاد مسیر موقت انتقال بار؛
- کاهش بار عضو آسیب‌دیده؛
- فراهم کردن دسترسی ایمن برای بررسی و اجرا؛
- محدود کردن تغییر شکل در مرحله حساس عملیات.

۴-۳-۲- روش‌های پایدارسازی موقت

روش‌های قابل بررسی می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- جک گذاری: نصب جک‌های مکانیکی یا هیدرولیک در زیر تیرهای اصلی سقف، زیر نواحی دارای افتادگی یا در محل‌های بحرانی برای تحمل موقت بخشی از بار و جلوگیری از افتادگی یا ریزش؛
- داربست بندی: اجرای داربست در زیر سقف‌های ترک‌خورده، کف‌های نامطمئن یا اعضای که احتمال ریزش موضعی دارند، به گونه‌ای که بار سقف یا عضو آسیب‌دیده به‌طور موقت به زمین یا تکیه‌گاه ایمن منتقل شود؛
- دستک‌های مایل: اجرای دستک‌های مایل موقت برای مهار دیوارهای دارای ترک مورب، کج شدگی یا خطر واژگونی خارج از صفحه. زاویه، محل تکیه‌گاه، نوع اتصال و ظرفیت مهار بهتر است بر اساس طرح مهندسی تعیین شود.

پایدارسازی موقت جایگزین ارزیابی و مداخله نهایی نیست و باید وضعیت آن در دوره استفاده به‌طور منظم کنترل شود.

۴-۴- بهسازی زمین و مقاوم‌سازی پی

۴-۴-۱- مطالعات و الزامات پیش از مداخله

پیش از انتخاب روش بهسازی زمین یا پی، اطلاعات زیر می‌تواند مورد نیاز باشد:

- مشخصات لایه‌های زیرسطحی؛
- وضعیت آب زیرزمینی و تغییرات آن؛
- نوع، ابعاد و عمق شالوده؛
- بارهای وارد بر پی؛
- وضعیت تماس پی و خاک؛
- الگوی نشست و تغییر شکل؛
- شرایط ساختمان‌ها و تأسیسات مجاور؛

- محدودیت دسترسی، ارتفاع و فضای کار.

در صورت نبود اطلاعات کافی درباره پی موجود، باز کردن موضعی، گمانه‌زنی، آزمایش‌های ژئوتکنیکی یا روش‌های بررسی غیر مخرب و نیمه مخرب می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. عملیات بهسازی پی باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که پایداری ساختمان در تمامی مراحل حفظ شود. در صورت مشاهده تغییر شکل سریع یا نشانه ناپایداری، مرحله مرتبط از عملیات باید متوقف و وضعیت فنی بررسی شود.

۴-۴-۲- افزایش یکپارچگی و سختی سیستم پی

در این رویکرد، هدف افزایش یکپارچگی و سختی کلی سیستم پی برای کاهش اثر نشست غیریکنواخت و توزیع بهتر تغییر مکان نسبی بین تکیه‌گاه‌ها است. اتصال پی‌های منفرد، اجرای شناژهای طولی و عرضی، تقویت کلاف‌های موجود یا افزایش ظرفیت خمشی و برشی شالوده می‌تواند در برخی ساختمان‌ها به توزیع مناسب‌تر نیرو و تغییر شکل کمک کند.

روش‌های قابل بررسی عبارت‌اند از:

- اجرای شناژ یا تیر رابط میان پی‌ها؛
- تقویت شناژها و کلاف‌های موجود؛
- افزایش ابعاد پی؛
- افزایش ضخامت یا ظرفیت خمشی و برشی پی؛
- تبدیل مجموعه‌ای از پی‌های منفرد به سیستم پیوسته‌تر.

۴-۴-۳- پر کردن حفره‌های زیر پی و ترمیم شکاف‌های زمین

در محل‌هایی که حفره‌ها و فضاهای خالی در زیر پی سازه‌های موجود ایجاد شده‌اند، نخستین اولویت، پایداری سازه و سپس تعیین علت و هندسه زیرسطحی حفره است. پس از شناسایی شرایط زیرسطحی، می‌توان با حفاری گمانه از داخل سازه، دوغاب را برای پر کردن فضاهای خالی، متراکم کردن و پایداری خاک و تقویت زیر پی تزریق کرد. تزریق تراکمی به ویژه برای تقویت زیر پی سازه‌های تحت تأثیر فروچاله‌های فرونشستی مؤثر است و عملیات تزریق تا رسیدن به حد امتناع ادامه می‌یابد. در مورد شکاف‌های ایجادشده در زمین نیز روش‌های متداول اصلاح شامل پر کردن با ماسه و خاک، شن یا دوغاب است. در روش تزریق، دوغاب در امتداد شکاف نفوذ کرده، شکاف‌ها را پر می‌کند و به خاک اطراف نفوذ می‌نماید. با این حال، در اصلاح حفره‌ها و فروچاله‌ها باید علت زیرین نیز برطرف شود، زیرا در صورت مسدود نشدن شکاف‌های زیرین، مصالح پرکننده ممکن است دوباره به داخل آن‌ها شسته شوند و فرونشست مجدداً ظاهر شود.

۴-۴-۴- بهسازی خاک زیر پی

مقاوم‌سازی بستر و خاک زیر پی به‌منظور افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست‌های موضعی، کنترل نفوذپذیری و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی توده خاک در محدوده پی ساختمان‌های موجود صورت می‌گیرد. انتخاب روش مناسب، تابعی از شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه، اهداف بهسازی، محدودیت‌های اجرایی و تحلیل اقتصادی خواهد بود. روش‌های قابل بررسی در این زمینه شامل موارد زیر است:

- اختلاط عمیق خاک؛
- تزریق پرفشار؛
- اجرای ریز شمع‌ها.

۴-۴-۴-۱- اختلاط عمیق خاک

اختلاط عمیق خاک از روش‌های بهسازی است که در طیف وسیعی از خاک‌ها تا عمق حدود ۶۰ متر کاربرد دارد. این روش شامل اصلاح خاک موجود در محل با افزایش مقاومت، کنترل تغییر شکل‌ها و کاهش نفوذپذیری است. محل‌هایی که زمین به نشست حساس است و یا تراز آب زیرزمینی در آن‌ها بالا است و یا خاک آن‌ها نرم هستند، از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای بهسازی به روش اختلاط عمیق هستند. با استفاده از اختلاط عمیق خاک، زمین در شرایط درجا اصلاح می‌شود. مشخصات ژئوتکنیکی آن به سطح قابل قبول رسانده می‌شود و این زمین اصلاح شده بخشی از سامانه خاک - سازه می‌گردد. در نهایت کنترل و تائید کیفی کار نیز مقدور است. وجود تأسیسات زیرزمینی می‌تواند بر روی انتخاب روش اختلاط عمیق تأثیرگذار باشد. در لایه‌های سخت خاک ممکن است نیاز به پیش حفاری باشد تا ستون‌های خاک سیمان به‌صورت همگن ایجاد شوند.

خاک‌های غیر چسبنده معمولاً ساده‌تر از خاک‌های چسبنده مخلوط می‌شوند. خاک‌های چسبنده بسته به میزان پلاستیسیته و رطوبت خود انرژی متفاوتی برای اختلاط نیاز دارند. به خاک‌های نباتی مقادیر فراوانی از مواد افزودنی باید اضافه نمود و قبل از شروع عملیات اجرایی، لازم است از عملکرد سیستم اختلاط در آزمایشگاه اطمینان حاصل کرد. با اختلاط خاک در محل می‌توان انواع خاک‌ها را اصلاح نمود. در خاک‌های نرم، در مقایسه با سایر روش‌های اصلاح خاک، این روش اقتصادی‌ترین شیوه‌های بهسازی است.

در روش اختلاط عمیق از ملات‌های مختلف استفاده می‌شود. چهار نوع رایج آهک برای پایدارسازی خاک شامل کلسیم اکسید (به عبارت دیگر آهک غیر شکفته یا آهک زنده)، کلسیم هیدروکسید (آهک شکفته یا آهک هیدراته)، هیدروکسید مرطوب و آهک ویژه بر پایه آهک هستند. سیمان پرتلند معمولی و سیمان روباره کوره‌های بلند دو نوع رایج از سیمان پرکاربرد هستند. اختلاط سیمان آهک نیز به شدت مورد استفاده قرار گرفته است که در آن آهک با سیمان ترکیب می‌شود. نسبت سیمان به آهک وابسته به کاربرد و مشخصات مهندسی مورد نیاز است. خاکستر بادی نیز بعضی اوقات به سیمان افزوده می‌شود.

۴-۴-۲- تزریق پرفشار

روش تزریق پرفشار در انواع خاک‌ها، صرف‌نظر از نفوذپذیری و دانه‌بندی، از رس و سیلت نرم تا ماسه و شن قابل استفاده است. این روش در زیر سطح آب زیرزمینی و در محیط‌های پوشیده یا دارای محدودیت اجرایی نیز قابل بررسی است. همچنین پیش از تدوین یا نهایی کردن طرح، باید اطلاعات مربوط به ساختمان‌های مجاور و تأسیسات مدفون زیرزمینی اطراف جمع‌آوری شود.

تزریق پرفشار عموماً در عمق‌هایی که پوشش خاک کافی در بالای ناحیه تزریق وجود دارد، مناسب‌تر است. در اعماق کم، فشار بالای سیال و دوغاب ممکن است موجب فرار دوغاب به سطح زمین، بالا زدگی موضعی خاک یا ایجاد آسیب در کف، پی و تأسیسات مجاور شود.

بسته به نیاز پروژه و شرایط خاک، استفاده از یکی از سه روش اجرایی زیر بلامانع است:

الف) روش تک سیال: صرفاً تزریق دوغاب سیمان با فشار بالا.

ب) روش دو سیال: تزریق هم‌زمان دوغاب سیمان و هوای فشرده.

پ) روش سه سیال: تزریق هم‌زمان آب پرفشار، هوای فشرده و دوغاب سیمان.

ستون‌های تزریق شده می‌توانند به اشکال استوانه‌ای، دیواری، نواری یا بلوکی طراحی و اجرا شوند.

۴-۴-۳- ریز شمع‌ها

ریز شمع‌ها شمع‌هایی با قطر کم هستند که معمولاً با قطر حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و در برخی موارد کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر اجرا می‌شوند. این شمع‌ها می‌توانند به‌صورت قائم یا مایل در اطراف شالوده، در مجاورت آن یا در صورت امکان در داخل جسم شالوده اجرا شوند. استفاده از ریز شمع‌ها به ویژه در ساختمان‌های موجود که محدودیت فضا، محدودیت دسترسی یا امکان اجرای شمع‌های با قطر بزرگ وجود دارد، مناسب است.

عملکرد اصلی ریز شمع‌ها، انتقال بار ساختمان از لایه‌های سطحی ضعیف به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تر است. علاوه بر این، به دلیل تزریق دوغاب سیمان و نفوذ آن در خاک اطراف ریز شمع، مشخصات مکانیکی خاک نیز به‌صورت موضعی بهبود یافته و ظرفیت باربری مجموعه خاک و پی افزایش می‌یابد؛ بنابراین ریز شمع‌ها را می‌توان به‌عنوان روشی برای تقویت پی، کنترل نشست و انتقال بار به عمق بیشتر در نظر گرفت.

اجرای ریز شمع معمولاً شامل مراحل حفاری، لوله‌گذاری یا لوله‌کوبی، تسلیح و تزریق دوغاب سیمان است. در صورت عدم امکان کوبش لوله، حفاری سوراخ با قطر حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر انجام می‌شود. سپس لوله فولادی مشبک و آرماتور لازم در محل قرار گرفته و دوغاب سیمان تحت فشار تزریق می‌شود.

فشار تزریق باید متناسب با عمق تزریق، نوع خاک، شرایط ژئوتکنیکی محل و وضعیت پی موجود تعیین و کنترل شود. فشار بیش از حد می‌تواند موجب ایجاد تنش اضافی، بالا زدگی موضعی، تشدید ترک‌ها یا نشست ناخواسته گردد. حداکثر فشار تزریق معمولاً به حدود ۱۰ اتمسفر محدود می‌شود. نسبت آب به سیمان دوغاب معمولاً در محدوده ۰/۵ تا ۱/۵

انتخاب می‌گردد و مقدار سیمان مصرفی می‌تواند حدود ۱۰۰ کیلوگرم به ازای هر متر ریز شمع باشد (نشریه شماره ۵۲۴، ۱۳۸۹).

۴-۴-۵- بهسازی پی‌های سطحی

در پی‌های بتن‌آرمه، اجزای موجود و اجزای الحاقی باید از نظر نیروهای مؤثر بر پی، از جمله برش، خمش و نیروی محوری، بررسی شوند. در صورت اضافه شدن بتن جدید، شمع، ریز شمع، شناژ یا هر عضو تقویتی دیگر، اتصال بین بخش قدیم و جدید باید به‌گونه‌ای طراحی شود که انتقال نیرو و عملکرد یکپارچه پی تأمین گردد. در ساختمان‌های قدیمی که پی از سنگ، آجر یا مصالح بنایی با ملات ساخته شده است، تغییر شکل پی و انعطاف‌پذیری خاک زیر آن باید در ارزیابی لحاظ شود. در بهسازی این نوع پی‌ها، توجه به یکپارچگی پی، مسیر انتقال بار و جلوگیری از گسترش ترک‌خوردگی اهمیت دارد.

۴-۴-۵-۱- افزایش ابعاد شالوده

در مواردی که افزایش سطح تماس پی با خاک بتواند فشار وارد بر خاک را کاهش دهد، می‌توان با افزودن بتن مسلح به اطراف پی، ابعاد شالوده را افزایش داد. این روش به‌تنهایی تضمین‌کننده کاهش نشست تفاضلی نیست و ممکن است توزیع تنش در خاک و نیروهای داخلی پی را تغییر دهد. اتصال بخش جدید و قدیم و ظرفیت خمشی، برشی و پانچ پی باید بررسی شود.

۴-۴-۵-۲- شناژها و تیرهای رابط

در صورت وجود پی‌های منفرد یا نشست غیریکنواخت بین تکیه‌گاه‌ها، می‌توان با اجرای شناژهای طولی و عرضی، پی‌ها را به یکدیگر متصل کرد تا تغییر مکان نسبی بین آن‌ها کاهش یابد و مسیر انتقال نیرو منظم‌تر شود.

۴-۴-۶- انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر

در شرایطی که خاک زیر پی ظرفیت باربری کافی نداشته باشد یا ظرفیت باربری خود را از دست داده باشد، می‌توان بار ساختمان را با به لایه‌های مقاوم‌تر در عمق منتقل کرد.

۴-۴-۶-۱- شمع‌های فشاری

این روش می‌تواند برای خاک‌های نرم قابل استفاده باشد. در این روش، از داخل یا کنار پی‌های موجود، سوراخ‌هایی ایجاد شده و با استفاده از جک، شمع‌های کوچک، معمولاً بتنی یا فولادی، به‌صورت فشاری به داخل خاک رانده می‌شوند تا بار ساختمان به لایه‌های مقاوم‌تر در عمق منتقل شود.

۴-۴-۶-۲- پی‌بندی کردن

در صورتی که شالوده موجود بر روی خاکی با ظرفیت کم احداث شده باشد، با استفاده از این روش می‌توان بارهای روسازه را به لایه‌های تحتانی خاک که دارای شرایط مناسب‌تری می‌باشند، منتقل نمود. مراحل اجرای شمع در زیر شالوده به ترتیب زیر است:

- کندن پیرامون شالوده از روی زمین تا قسمت زیرین شالوده؛
- حفاری و آرماتور گذاری و بتن‌ریزی شمع تا تراز زیر گالری در دو طرف شالوده؛
- اجرای گالری افقی و آرماتور گذاری تیر سر شمع؛
- قالب‌بندی دیواره‌های قائم سر شمع؛
- بتن‌ریزی سر شمع و عمل‌آوری آن؛
- پر کردن قسمت‌های کنده شده با خاک فشرده دانه‌ای؛
- اجرای کف و سنگ‌فرش‌های اطراف دیوار.

۴-۴-۷- بهسازی پی‌های عمیق موجود

در ساختمان‌های دارای شمع یا پی عمیق، آسیب می‌تواند با کاهش ظرفیت، تغییر شرایط خاک پیرامون، شکست یا آسیب شمع، نشست کلاhek یا تغییر مسیر بار مرتبط باشد. در چنین شرایطی، روش‌های زیر قابل بررسی است:

- الف) افزودن شمع جدید یا ریز شمع؛
- ب) افزایش ابعاد یا تقویت کلاhek شمع؛
- پ) بهبود خاک اطراف شمع‌ها با تزریق دوغاب؛
- ت) استفاده از شمع‌های مورب.

تذکر: در خاک‌های دارای خطر روانگرایی یا شرایط ژئوتکنیکی نامطمئن، استفاده از شمع‌های مورب یا روش‌های مشابه بهتر است با احتیاط و پس از ارزیابی ژئوتکنیکی انجام شود.

۴-۴-۸- اتصال پی به سازه فوقانی

در برخی موارد، آسیب ناشی از نشست فقط به ضعف خود پی مربوط نیست، بلکه ضعف اتصال سازه به پی نیز می‌تواند در گسترش خرابی نقش داشته باشد.

در ستون فولادی، وضعیت صفحه‌ستون، بولت‌های مهار، گروت زیر صفحه، سخت‌کننده‌ها و تماس صفحه و پی می‌تواند بررسی شود. در صورت وجود جداشدگی، تغییر شکل یا آسیب، تقویت اتصال بر اساس مسیر انتقال نیرو طراحی می‌شود.

در ساختمان‌های بنایی، اگر ترک یا جداشدگی در محل اتصال دیوار باربر به شناژ یا پی مشاهده شود، می‌توان از میلگردهای مهاری یا روش‌های دوخت و اتصال مناسب برای برقراری پیوستگی بین دیوار و پی استفاده کرد. در ساختمان‌های بتن‌آرمه، اتصال میلگردها، طول مهاری، کیفیت بتن ناحیه اتصال و ترک‌های اطراف ستون یا دیوار می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۴-۹- ترمیم ترک‌ها و حفره‌های پی

در صورتی که خود شالوده دچار ترک‌خوردگی شده باشد، می‌توان از تزریق دوغاب سیمانی یا رزین مناسب برای پر کردن و ترمیم ترک استفاده کرد. در این روش، سوراخ‌های تزریق باید به‌گونه‌ای اجرا شوند که ماده تزریقی بتواند به عمق ترک نفوذ کند.

برای ترمیم ترک‌های شالوده، محل و فاصله سوراخ‌های تزریق، زاویه حفاری، نوع ماده تزریقی، فشار تزریق و زمان توقف عملیات باید بر اساس وضعیت ترک، جنس شالوده و شرایط اجرایی تعیین شود. در پی‌های منفرد یا نواری، اجرای تزریق باید به‌صورت مرحله‌ای انجام شود تا از تمرکز فشار و آسیب بیشتر به شالوده جلوگیری گردد.

۴-۵- مقاوم‌سازی اعضای سازه بتنی

۴-۵-۱- ترک‌های خمشی در تیرها، دال‌ها و سقف‌ها

در صورتی که بخشی از ساختمان نسبت به بخش‌های دیگر دچار نشست بیشتری شود، ممکن است تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی اضافی در تیرها و دال‌ها ایجاد شود. این وضعیت، بسته به الگوی تغییر شکل، شرایط تکیه‌گاهی و محل ایجاد تنش کششی، می‌تواند به بروز یا گسترش ترک‌های خمشی منجر شود.

ترک‌های خمشی ممکن است در پایین دهانه، بالای تکیه‌گاه‌ها یا سایر نواحی دارای لنگر خمشی قابل‌توجه ظاهر شوند. با این حال، تشخیص ماهیت ترک صرفاً بر اساس محل ظاهری آن کافی نیست و باید الگو، عمق، عرض، امتداد و وضعیت فعالیت ترک نیز بررسی شود.

۴-۵-۱-۱- روش‌های ترمیم و مقاوم‌سازی

در صورتی که بررسی‌های سازه‌ای نشان دهد ظرفیت خمشی یا بهره‌برداری عضو تحت تأثیر قرار گرفته است، روش‌های زیر، حسب مورد، قابل بررسی است:

- چسباندن ورق فولادی در ناحیه کششی عضو؛
- استفاده از ورق‌های مسلح شده با الیاف (FRP) در ناحیه کششی عضو؛
- استفاده از صفحات یا نواریهای کربنی پیش‌تنیده در مواردی که افزایش ظرفیت بیشتری مورد نیاز باشد؛
- استفاده از ژاکت بتنی، ژاکت فولادی.

۴-۵-۲- ترک‌های برشی و قطری در تیرها و ستون‌ها

نشست غیریکنواخت ممکن است موجب باز توزیع نیروهای داخلی و افزایش نیروهای برشی، خمشی یا پیچشی در برخی تیرها، ستون‌ها و نواحی نزدیک تکیه‌گاه‌ها شود. این وضعیت می‌تواند به ایجاد یا گسترش ترک‌های مورب و قطری منجر شود.

ترک‌های مورب الزاماً ناشی از برش خالص نیستند و ممکن است تحت تأثیر ترکیبی از خمش، برش، پیچش، تغییر شکل تکیه‌گاهی یا ضعف موضعی ایجاد شده باشند؛ بنابراین، تعیین علت ترک باید بر اساس الگوی ترک‌خوردگی و تحلیل رفتار عضو انجام شود.

در صورت مشاهده ترک‌های عمیق یا باز شونده، خردشدگی بتن، جداسازی پوشش بتن، توصیه می‌شود ظرفیت باقی‌مانده عضو و ضرورت پایدارسازی موقت آن بررسی شود.

۴-۵-۲-۱- روش‌های ترمیم و مقاومت‌سازی

برای افزایش ظرفیت برشی اعضای آسیب‌دیده، روش‌های زیر، با توجه به شرایط عضو و نتایج طراحی، قابل بررسی است:

- استفاده از صفحات فولادی، تسمه‌ها یا اجزای فولادی U شکل در اطراف عضو؛
- استفاده از نوارهای پلیمر مسلح به الیاف کربن (CFRP) به شکل U یا حلقه‌ای؛
- استفاده از توری فولادی همراه با ملات.

۴-۵-۳- آسیب‌های ستون‌ها و کاهش ظرفیت باربری محوری

نشست غیریکنواخت ممکن است موجب ایجاد انحراف یا کج شدگی ستون، افزایش خروج از مرکزیت بار، تغییر نیروی محوری، افزایش لنگر خمشی یا ایجاد آثار مرتبه دوم شود.

۴-۵-۳-۱- روش‌های ترمیم و مقاومت‌سازی

در صورتی که بر اساس ارزیابی سازه‌ای، افزایش ظرفیت محوری، برشی، خمشی یا شکل‌پذیری ستون ضروری تشخیص داده شود، روش‌های زیر قابل بررسی است:

- افزایش سطح مقطع ستون؛
- ژاکت بتنی یا فولادی برای افزایش ظرفیت و بهبود محصورسازی بتن؛
- استفاده از پروفیل‌ها یا غلاف‌های فولادی پیرامونی؛
- محصورسازی ستون با FRP، در صورتی که سطح بتن سالم باشد؛
- جایگزینی یا ترمیم بتن خردشده پیش از اجرای هر نوع پوشش یا ژاکت تقویتی.

۴-۵-۴- آسیب اتصال تیر به ستون

نشست غیریکنواخت ممکن است موجب ایجاد تغییر شکل‌های اضافی و باز توزیع نیروها در ناحیه اتصال تیر به ستون شود. این وضعیت می‌تواند با ترک‌های مورب، کاهش مقاومت برشی هسته اتصال، خردشدگی بتن، تمرکز تنش در گوشه‌ها یا آسیب‌دیدگی آرماتورهای عبوری همراه باشد.

۴-۵-۴-۱- روش‌های ترمیم و مقاوم‌سازی

روش‌های زیر، پس از تعیین علت و شدت آسیب و بر اساس نتایج طراحی، قابل بررسی است:

- روکش بتنی، فولادی یا FRP برای افزایش مقاومت و محصورسازی ناحیه اتصال؛
- استفاده از صفحات یا نبشی‌های فولادی در اطراف اتصال؛
- کاشت میلگرد یا میلگردهای دوخت؛
- تزریق رزین اپوکسی در ترک‌های غیرفعال، خشک و مناسب برای تزریق؛
- ترمیم یا جایگزینی آرماتورهای آسیب‌دیده مطابق جزئیات طراحی.

۴-۵-۵- دیوار برشی بتنی و روکش بتنی

در دیوارهای برشی یا دیوارهای بتنی آسیب‌دیده، نشست غیریکنواخت ممکن است موجب ایجاد ترک‌های قطری، تمرکز تنش و خردشدگی موضعی بتن شود. انتخاب روش مقاوم‌سازی باید بر اساس نوع و الگوی ترک، شدت آسیب، وضعیت آرماتورها، شرایط پی و نقش دیوار در سیستم باربر جانبی انجام شود.

الف) افزایش ضخامت دیوار با شاتکریت یا بتن مسلح: در صورتی که بررسی‌های سازه‌ای کاهش ظرفیت یا سختی دیوار را نشان دهد، افزایش ضخامت دیوار با استفاده از بتن پاششی یا بتن مسلح می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. در این روش، شبکه آرماتور جدید باید به وسیله اتصالات و مهارهای طراحی شده به دیوار موجود متصل شود. همچنین لازم است انتقال برش در سطح تماس و عملکرد یکپارچه دیوار موجود و لایه تقویتی تأمین شود.

ب) اجرای شبکه فولادی یا مش مسلح کننده: استفاده از مش فولادی یا شبکه مسلح کننده همراه با ملات یا بتن می‌تواند به افزایش یکپارچگی، مقاومت برشی و کنترل گسترش ترک‌ها کمک کند.

پ) تزریق ترک‌های غیرفعال: در ترک‌هایی که عامل ایجاد آن‌ها کنترل شده و غیرفعال بودن آن‌ها با پایش یا بررسی فنی تأیید شده باشد، می‌توان از تزریق رزین اپوکسی، پلی‌اورتان یا دوغاب مناسب برای پر کردن ترک و بازیابی پیوستگی استفاده کرد. انتخاب ماده تزریقی باید بر اساس پهنای ترک، عمق ترک، وضعیت رطوبت و هدف ترمیم انجام شود.

ت) ترمیم بتن آسیب‌دیده: در صورت وجود بتن خردشده، پوک یا جداشده، ابتدا باید بخش‌های آسیب‌دیده برداشته و با بتن یا ملات ترمیمی مناسب جایگزین شوند. پس از ترمیم سطح، می‌توان روش‌های تقویتی مانند روکش بتنی، مش مسلح کننده یا FRP را اجرا کرد.

۴-۵-۶- کاشت آرماتور

در مقاوم سازی سازه‌های بتنی، می‌توان از آرماتورهای کاشته شده برای اتصال آرماتور جدید به بتن موجود و انتقال نیرو استفاده کرد. در این روش، بار آرماتور کاشته شده از طریق ماده چسباننده و بتن به آرماتورهای موجود منتقل می‌شود و آرماتور کاشته شده، در صورت طراحی و اجرای مناسب، مشابه آرماتور تعبیه شده در بتن عمل می‌کند. در اجرای کاشت نیز روش حفاری، وضعیت رطوبتی بتن، تمیز کردن سوراخ، انتخاب چسب مناسب، تزریق چسب و رعایت زمان گیرش نهایی اهمیت دارد؛ زیرا حفاری نامناسب، پاک سازی نشدن سوراخ یا انتخاب قطر نامناسب سوراخ می‌تواند موجب کاهش مقاومت پیوستگی آرماتور کاشته شده شود.

۴-۵-۷- ترمیم ترک‌ها

این راهنما روش مشخصی را برای ترمیم همه ترک‌ها تجویز نمی‌کند؛ زیرا انتخاب روش مناسب به علت ایجاد ترک، وضعیت فعالیت آن، عرض و عمق ترک، شرایط رطوبتی، وضعیت سازه و هدف ترمیم بستگی دارد. مهندس طراح یا متخصص ترمیم باید پس از بررسی علت ترک، روش مناسب را در نقشه‌ها و مشخصات فنی تعیین کند. همچنین باید پیش از ترمیم نهایی، فعال یا غیرفعال بودن ترک‌ها از طریق پایش مناسب مشخص و عامل اصلی ایجاد آن‌ها تا حد امکان، کنترل یا پایدار شود. ترمیم ظاهری ترک بدون کنترل علت ایجاد آن ممکن است به بازشدگی مجدد ترک یا انتقال آسیب به ناحیه دیگری منجر شود. فعال بودن فرونشست منطقه‌ای الزاماً به معنی فعال بودن ترک یا تغییر شکل ساختمان نیست و تصمیم درباره نوع ترمیم باید بر اساس وضعیت ترک و حرکت ساختمان انجام شود.

۴-۵-۷-۱- دسته‌بندی مواد ترمیمی بر اساس نوع ترک

الف) ترک‌های غیرفعال

در ترک‌هایی که غیرفعال بودن آن‌ها مطابق بند ۳-۷ تائید شده و عامل ایجاد ترک تا حد امکان کنترل شده باشد، استفاده از رزین اپوکسی، پلی‌اورتان، دوغاب سیمانی، ملات ترمیمی یا سایر مواد سازگار می‌تواند با توجه به نوع عضو، پهنا و عمق ترک، وضعیت رطوبت و هدف ترمیم بررسی شود.

ب) ترک‌های فعال

در ترک‌های فعال، استفاده از مواد صلب و شکننده به تنهایی ممکن است به بازشدگی مجدد ترک یا انتقال آسیب به ناحیه دیگری منجر شود. در این شرایط، ابتدا باید علت، جهت و دامنه حرکت بررسی شود. برای آب‌بندی، حفاظت یا ترمیم اجزایی که باید قابلیت حرکت خود را حفظ کنند، استفاده از درزگیرها، مواد انعطاف‌پذیر یا جزئیات دارای قابلیت تحمل حرکت می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

پ) ترک‌های با وضعیت نامشخص

در صورتی که اطلاعات برای تشخیص فعال یا غیرفعال بودن ترک کافی نباشد، وضعیت آن نامشخص ثبت می‌شود. در چنین شرایطی، ترمیم دائمی بهتر است تا تکمیل بررسی یا پایش به تعویق افتد، مگر آنکه انجام اقدام موقت برای آب‌بندی، حفاظت یا تأمین ایمنی ضرورت داشته باشد. اقدام موقت نباید امکان مشاهده و پایش ترک را از بین ببرد. (ت) ترک‌های عریض

پهنای ترک یک ویژگی هندسی است و مستقل از وضعیت فعالیت آن بررسی می‌شود. برای ترک‌های عریض و غیرفعال، استفاده از دوغاب سیمانی، دوغاب فوق‌ریز، ملات پلیمری یا سایر مواد پرکننده سازگار می‌تواند بررسی شود. در ترک‌های عریض فعال، انتخاب روش باید با توجه به دامنه حرکت و عملکرد مورد انتظار انجام شود.

۴-۶- مقاوم‌سازی اعضای سازه فولادی

نشست غیریکنواخت ممکن است موجب تغییر شرایط تکیه‌گاهی، مسیر انتقال بار و توزیع نیروهای داخلی در سازه فولادی شود. در چنین شرایطی، احتمال دارد در تیرها، ستون‌ها، اتصالات، مهاربندها و اجزای مرتبط، نیروهای محوری، برشی، خمشی یا تغییر شکل‌های اضافی ایجاد شود.

همچنین، در اثر نشست یک تکیه‌گاه یا ستون، بخشی از بار ممکن است به اعضای مجاور منتقل شود و در نتیجه، تقاضای وارد بر آن‌ها افزایش یابد. پیامدهای احتمالی این وضعیت می‌تواند شامل افزایش احتمال کمانش کلی یا موضعی، تسلیم مقطع، لغزش یا تغییر شکل اتصال، کاهش پیش‌تنیدگی برخی پیچ‌ها، ترک‌خوردگی جوش یا تغییر شکل موضعی اجزای فولادی باشد.

۴-۶-۱- اصلاح سیستم باربر و مسیر انتقال نیرو

در صورتی که نشست موجب تغییر شرایط تکیه‌گاهی، مسیر انتقال نیرو یا نحوه مشارکت اعضای سازه شده باشد، اصلاح مسیر انتقال نیرو می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های مقاوم‌سازی بررسی شود. اقدامات قابل بررسی ممکن است شامل موارد زیر باشد:

- تغییر وضعیت توزیع بار؛
- تغییر مسیر انتقال نیرو؛
- تغییر ماهیت اتصالات یا شرایط مرزی؛
- افزودن اعضای کمکی.

هرگونه تغییر در سیستم باربر ممکن است موجب باز توزیع نیروها در سایر اعضا، اتصالات و پی‌ها شود؛ بنابراین، اثر این تغییرات بر رفتار کلی سازه و اجزای مجاور باید در تحلیل و طراحی مقاوم‌سازی در نظر گرفته شود.

۴-۶-۲- تقویت تیرها و ستون‌ها با ورق‌های تقویتی

در صورتی که ارزیابی سازه‌ای نشان دهد ظرفیت خمشی، برشی، محوری، پیچشی یا پایداری یک تیر یا ستون فولادی کافی نیست، استفاده از ورق‌ها یا اجزای فولادی تقویتی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. ورق‌های تقویتی ممکن است به بال، جان یا سایر قسمت‌های مقطع متصل شوند تا سطح مقطع مؤثر یا ظرفیت مقاومتی عضو افزایش یابد.

اگر تقویت با جوشکاری یا پیچ کاری در حالی انجام شود که عضو تحت بار است، باید تنش موجود در عضو، امکان باربرداری موقت، ترتیب جوشکاری، کنترل اعوجاج، نوع الکتروود، پیش گرم و الزامات اجرایی اتصال کنترل شود. در صورت زیاد بودن تنش موجود، لازم است پیش از اجرای تقویت، بار عضو کاهش داده شود یا تمهیدات موقت در نظر گرفته شود.

۴-۶-۳- تقویت اتصالات فولادی

نشست غیریکنواخت ممکن است موجب ایجاد نیروها یا تغییر شکل‌های اضافی در اتصالات تیر به ستون، اتصالات مهاربندها، وصله‌ها، اتصالات پای ستون و اتصالات نشیمن شود. پیامدهای احتمالی این وضعیت می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- ترک یا ناپیوستگی در جوش؛
- لق شدن یا آسیب پیچ‌ها؛
- گشاد شدگی یا تغییر شکل سوراخ‌های پیچ؛
- تغییر شکل ورق‌های اتصال؛
- آسیب دیدگی چشمه اتصال.

پیش از انتخاب روش ترمیم یا تقویت، مناسب است نوع، محل، گستره و علت آسیب، وضعیت اجزای اتصال و ظرفیت باقیمانده آن بررسی شود. در برخی سازه‌های فولادی موجود، اتصالات به صورت ساده، نیمه صلب یا صلب و با استفاده از نبشی جان، نبشی نشیمن، ورق انتهایی، ورق اتصال، پیچ، پرچ یا جوش اجرا شده‌اند. نشست ممکن است موجب افزایش دوران تیر، تمرکز تنش در ورق‌ها و نبشی‌ها یا افزایش تقاضا در پیچ‌ها، پرچ‌ها و جوش‌ها شود. از طرف دیگر، استفاده از سیستم‌های مهاربندی فولادی به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی می‌تواند با افزایش سختی جانبی قاب، موجب کاهش تغییر مکان‌ها و تغییر شکل‌های سازه‌ای شود.

۴-۶-۴- استفاده از مهاربندهای ضربدري

قاب‌های با مهاربندی هم‌مرکز (CBF) به دلیل سختی جانبی بالا، قابلیت مناسبی در کنترل تغییر شکل‌های سازه‌ای دارند. افزایش سختی سازه می‌تواند اثرات ناشی از تغییر شکل‌های اضافی، از جمله تغییرات ایجاد شده در اثر نشست

غیریکنواخت را کاهش دهد؛ بنابراین، افزودن مهارندهای ضربدری فولادی می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای افزایش سختی و محدود کردن آثار سازه‌ای ناشی از نشست غیریکنواخت مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۶-۱- روش‌های ترمیم و تقویت

الف) ترمیم یا تقویت جوش‌ها: در صورت آسیب‌دیدگی جوش‌ها، می‌توان با افزایش طول جوش، افزایش اندازه مؤثر جوش یا اجرای جوش تقویتی، ظرفیت اتصال را افزایش داد.

افزایش طول یا اندازه جوش نباید بدون ارزیابی ظرفیت فلز پایه، مسیر انتقال نیرو، تمرکز تنش و آثار حرارتی انجام شود. ب) جایگزینی پیچ‌ها: در صورت آسیب‌دیدگی پیچ‌ها، می‌توان آن‌ها را با پیچ‌های پر مقاومت مناسب جایگزین کرد. جایگزینی پیچ یا پرچ موجود با پیچ پر مقاومت، به‌تنهایی به معنای افزایش ظرفیت کل اتصال نیست و ظرفیت ورق‌ها، سوراخ‌ها، جوش‌ها و سایر اجزای اتصال نیز باید کنترل شود.

در اتصالات اصطکاکی، انتقال نیرو عمدتاً از طریق اصطکاک بین سطوح تماس انجام می‌شود. از این‌رو، وضعیت سطوح تماس، نوع پوشش، نوع سوراخ و میزان پیش‌تنیدگی پیچ اهمیت دارد.

پ) تعویض هم‌زمان پیچ‌های مجاور در صورت نیاز: تعویض هم‌زمان پیچ‌های مجاور در همه اتصالات الزام عمومی محسوب نمی‌شود. تعداد پیچ‌ها یا پرچ‌هایی که می‌توان در هر مرحله برداشت، بهتر است با توجه به بار موجود، ظرفیت باقی‌مانده اتصال، پایداری موقت و روش اجرای کار تعیین شود. در برخی موارد، تعویض پیچ‌ها یا پرچ‌ها به‌صورت مرحله‌ای و یک‌به‌یک می‌تواند مناسب باشد.

ت) کنترل سوراخ‌های پیچ: در صورتی که سوراخ پیچ دچار گشاد شدگی یا آسیب موضعی شده باشد، باید ظرفیت برشی، کششی و لغزش اتصال کنترل شود. انتخاب قطر پیچ، نوع پیچ و روش ترمیم سوراخ باید بر اساس وضعیت موجود، مشخصات مصالح، الزامات طراحی و امکان اجرای صحیح اتصال انجام شود.

۴-۶-۵- صفحات فولادی، نبشی‌ها و ورق‌های اتصال

در اتصالاتی که بر اثر نشست دچار دوران اضافی، تغییر شکل موضعی، تسلیم ورق اتصال، آسیب نبشی نشیمن یا تمرکز تنش شده‌اند، استفاده از صفحات فولادی، نبشی‌های کمکی یا ورق‌های پوششی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

هدف از این روش‌ها ممکن است شامل اصلاح مسیر انتقال بار، افزایش ظرفیت یا سختی اتصال، کاهش تمرکز تنش و محدود کردن تغییر شکل‌های موضعی باشد.

روش‌های قابل بررسی شامل موارد زیر است:

استفاده از صفحات پوششی در ناحیه آسیب‌دیده؛

افزودن نبشی یا ورق کمکی در محل نشیمن تیر؛

تقویت یا تعویض ورق اتصال؛

افزودن ورق‌های پیوستگی یا ورق‌های مضاعف.

افزودن ورق یا نبشی تقویتی ممکن است مسیر انتقال نیرو و سختی اتصال را تغییر دهد؛ بنابراین، اتصال اجزای جدید به عضو موجود و همچنین ظرفیت نواحی مجاور باید در طراحی بررسی شود.

۴-۶-۶- استفاده از سخت‌کننده‌ها

در اثر نشست و باز توزیع نیروها، ممکن است نیروهای متمرکز یا نیروهای برشی بیشتری به جان تیر، جان ستون یا نواحی نزدیک اتصالات وارد شود. در چنین شرایطی، استفاده از سخت‌کننده‌های عرضی یا طولی می‌تواند بر اساس نوع ضعف عضو مورد بررسی قرار گیرد. سخت‌کننده‌ها معمولاً به‌صورت ورق‌های فولادی در یک یا دو طرف جان نصب می‌شوند و ممکن است به بال‌ها، جان یا هر دو متصل شوند.

افزودن سخت‌کننده الزاماً موجب افزایش ظرفیت برشی کلی عضو در همه شرایط نمی‌شود. نوع، ابعاد، فاصله، نحوه اتصال و میزان مشارکت سخت‌کننده باید متناسب با حالت حدی موردنظر طراحی شود.

۴-۶-۷- تبدیل مقطع باز به مقطع جعبه‌ای

در صورتی که ستون یا عضو فولادی مجاور ناحیه نشست دچار افزایش نیروی محوری، خمش، خروج از مرکزیت، ضعف پیچشی یا ناپایداری شود، تبدیل مقطع باز به مقطع جعبه‌ای یا شبه جعبه‌ای می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های تقویت بررسی شود. برای مثال، در برخی مقاطع I شکل یا مقاطع ساخته‌شده، می‌توان با افزودن ورق‌های فولادی، سختی خمشی یا پیچشی عضو را افزایش داد.

۴-۶-۸- تقویت ستون‌ها و مهاربندی سازه

در صورت افزایش نیروی محوری، لنگر ثانویه، خروج از مرکزیت، کاهش پایداری یا باز توزیع بار در ستون‌ها، روش‌های زیر می‌تواند بر اساس نتایج ارزیابی و طراحی مورد بررسی قرار گیرد:

- تقویت ستون با ورق‌های فولادی؛
- افزودن پروفیل یا اجزای فولادی به مقطع موجود؛
- تبدیل مقطع باز به مقطع جعبه‌ای یا شبه جعبه‌ای؛
- اصلاح یا تقویت مهاربندی جانبی سازه.

افزودن مهاربندهای همگرا، واگرا یا سایر اعضای جانبی می‌تواند به اصلاح مسیر انتقال نیرو و کنترل تغییر شکل‌ها کمک کند. با این حال، افزودن مهاربند ممکن است نیروهای وارد بر تیرها، ستون‌ها، دیافراگم‌ها، اتصالات و پی‌ها را افزایش دهد.

۴-۶-۹- ارزیابی و ترمیم ترک در اعضا و ورق‌های فولادی

مشاهده ترک در جان، بال، ورق اتصال، جوش یا سایر اجزای فولادی باید به‌عنوان نشانه‌ای مهم مورد بررسی قرار گیرد. پیش از هرگونه ترمیم، لازم است محل، طول، عمق، جهت، وضعیت رشد و علت احتمالی ترک با استفاده از بازرسی چشمی و در صورت نیاز روش‌های آزمون غیر مخرب تعیین شود. برای جلوگیری از گسترش سریع ترک، می‌توان به‌عنوان اقدام موقت، در دو انتهای ترک سوراخ‌های توقف ترک ایجاد کرد.

در ترک‌هایی که ترمیم جوشی برای آن‌ها مناسب تشخیص داده شود، می‌توان پس از برداشتن کامل بخش ترک‌خورده و آماده‌سازی مناسب شیار، جوش ترمیمی را بر اساس دستورالعمل جوش‌کاری تأییدشده اجرا کرد. در نواحی دارای ترک خوردگی گسترده، ممکن است لازم باشد بخش آسیب‌دیده بریده و با ورق یا قطعه جدید جایگزین شود.

۴-۷- مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی باربر

اگر دیوار در تحمل بارهای قائم یا مقاومت در برابر بارهای جانبی نقش داشته باشد، ترک یا تغییر شکل آن صرفاً آسیب معماری محسوب نمی‌شود و ممکن است نشانه کاهش ظرفیت باربری، مقاومت برشی یا یکپارچگی دیوار باشد. در ساختمان‌های بنایی، ترک‌های مورب یا قطری در دیوارهای اصلی باید با دقت بررسی شوند، زیرا می‌توانند نشانه تغییر شکل برشی یا ضعف در مسیر انتقال بار باشند.

در چنین دیوارهایی، پیش از انتخاب روش ترمیم یا مقاوم‌سازی، مناسب است نقش دیوار در سیستم باربر، نوع و الگوی ترک، عمق و پهنای آن، وضعیت مصالح، وضعیت روند تغییر شکل زمین، پی و ساختمان و ارتباط آسیب با بازشوها، تکیه‌گاه‌ها و اجزای مجاور بررسی شود. پس از شناسایی و تا حد امکان کنترل عامل ایجاد آسیب، راهکارهای زیر می‌توانند، حسب شرایط ساختمان و بر اساس نتایج ارزیابی و طراحی سازه‌ای، مورد بررسی قرار گیرند:

الف) اجرای روکش مسلح با بتن پاششی یا ملات مناسب، همراه با شبکه تقویتی و اتصال مناسب به دیوار موجود؛

ب) افزایش یکپارچگی دیوار از طریق اجرای یا تقویت کلاف‌های قائم و افقی؛

پ) بازچینی یا جایگزینی موضعی بخش‌های خرد شده یا فاقد پیوستگی کافی.

انتخاب هر یک از این راهکارها می‌تواند با توجه به نقش دیوار در سیستم باربر، نوع و سطح آسیب، وضعیت مصالح، روند تغییر شکل و آثار احتمالی مداخله بر اجزای مجاور انجام شود. جزئیات اجرایی، مشخصات مصالح و نحوه اتصال اجزای تقویتی باید در مدارک طراحی هر پروژه تعیین شود.

۴-۸- مقاوم سازی اجزای غیر سازه‌ای

در نشست غیریکنواخت، ترک خوردگی دیوارهای داخلی، گیرکردن درها، لق شدن سقف‌های کاذب، آسیب نما، شکست شیشه و جداشدگی قطعات غیر سازه‌ای می‌تواند از نخستین نشانه‌های قابل مشاهده برای ساکنان باشد. این آسیب‌ها الزاماً به معنی کاهش ظرفیت باربری کل ساختمان نیستند، اما از نظر ایمنی بهره‌برداران اهمیت دارند.

در ارزیابی اجزای غیر سازه‌ای، باید ابتدا نقش عضو مشخص شود. ترک در دیوار باربر یا دیوار برشی با ترک در دیوار پرکننده یا دیوار جداکننده غیر سازه‌ای یکسان نیست؛ بنابراین، پیش از انتخاب روش ترمیم، باید مشخص شود که عضو آسیب‌دیده در مسیر انتقال بار یا مقاومت جانبی ساختمان نقش دارد یا صرفاً یک جزء معماری و جداکننده است.

وضعیت فعالیت ترک‌های اجزای غیر سازه‌ای مطابق بند ۳-۷ و مستقل از وضعیت فعالیت زمین، پی یا ساختمان تعیین می‌شود. غیر سازه‌ای بودن جزء به معنی غیر سازه‌ای بودن منشأ ترک نیست؛ از این رو، پیش از ترمیم بهتر است احتمال ارتباط ترک با حرکت زمین، پی یا سازه بررسی شود.

در ترک‌های غیرفعال، ترمیم سطحی، پر کردن ترک، اجرای مش یا تعویض موضعی مصالح می‌تواند با توجه به نوع جزء، خطر جداشدگی و هدف ترمیم بررسی شود.

در ترک‌های فعال، استفاده از مواد صلب به‌تنهایی ممکن است به بازشدگی مجدد ترک منجر شود. در این شرایط، استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر، درزگیر مناسب، پوشش دارای قابلیت تغییر شکل یا جزئیات اتصال دارای امکان حرکت می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

در صورت نامشخص بودن وضعیت فعالیت، پایش یا استفاده از اقدام موقت قابل بازبینی می‌تواند پیش از ترمیم نهایی مورد توجه قرار گیرد.

۴-۸-۱- نماهای شیشه‌ای

نشست غیریکنواخت می‌تواند باعث تغییر شکل قاب نما و تغییر فاصله بین شیشه و قاب شود. در این حالت، اگر لبه‌های شیشه تحت فشار قرار گیرند یا فاصله آزاد کافی وجود نداشته باشد، احتمال ترک خوردگی، شکست یا خروج شیشه از محل خود افزایش می‌یابد.

در نماهای شیشه‌ای، لازم است تغییر شکل نسبی قاب، فاصله آزاد لبه‌های شیشه تا قاب، نحوه مهار شیشه و امکان حرکت نسبی اجزا بررسی شود. اتصال نما نباید به‌گونه‌ای باشد که با تغییر شکل محدود سازه، تنش زیادی به شیشه منتقل شود. در صورت نیاز، بهتر است نوع درزگیر، نحوه مهار و جزئیات قاب به‌گونه‌ای اصلاح شود که شیشه در اثر تغییر شکل قاب دچار شکست یا خروج از محل نشود.

۴-۸-۲- سقف‌های کاذب، پارتیشن‌ها و اجزای آویزان

نشست غیریکنواخت می‌تواند باعث لق شدن سقف‌های کاذب، باز شدن اتصالات آویزها، ترک خوردگی پارتیشن‌ها، جداسازی پوشش‌ها و آسیب اجزای آویزان شود. این اجزا معمولاً در باربری اصلی ساختمان نقشی ندارند، اما از نظر ایمنی جانی و بهره‌برداری اهمیت دارند.

در ارزیابی این اجزا باید موارد زیر بررسی شود:

- وضعیت اتصالات آویزها، قاب‌ها و قطعات نگه‌دارنده؛
- وجود قطعات لق، ترک خورده یا در آستانه سقوط؛
- امکان تغییر شکل نسبی بین جزء غیر سازه‌ای و سازه اصلی؛
- احتمال ضربه، سقوط یا خروج اجزا از محل نصب؛
- نیاز به مهاربندی، تعویض اتصال یا جمع‌آوری موضعی قطعات خطرناک.

در مناطق دارای نشست فعال، اتصال سقف‌های کاذب، پارتیشن‌ها و نماها بهتر است به گونه‌ای باشد که ضمن جلوگیری از سقوط، تغییر شکل نسبی محدود سازه را نیز تحمل کند. استفاده از اتصال کاملاً صلب، بدون پیش‌بینی امکان حرکت نسبی، می‌تواند باعث ترک خوردگی، کمانش، جداسازی یا ریزش اجزای غیر سازه‌ای شود.

۴-۸-۳- دیوارهای پرکننده درون قاب

دیوارهای پرکننده معمولاً درون قاب‌های بتنی یا فولادی اجرا می‌شوند. این دیوارها ممکن است در طراحی اولیه عضو باربر اصلی محسوب نشده باشند، اما در عمل می‌توانند بر رفتار قاب اثر بگذارند.

در صورت ترک خوردگی دیوار پرکننده، ابتدا باید سلامت قاب اصلی، ستون‌ها، تیرها و اتصالات بررسی شود. پس از آن، بسته به نقش دیوار و شدت آسیب، یکی از راهکارهای زیر قابل بررسی است:

الف) ترمیم دیوار، در صورتی که دیوار پایدار باشد، ترک غیرفعال تشخیص داده شود و ادامه حضور دیوار موجب افزایش نامطلوب تقاضا در قاب نشود؛

ب) جداسازی کنترل‌شده دیوار از قاب یا ایجاد درز مناسب، در صورتی که دیوار باعث فشار موضعی، تمرکز تنش یا اختلال در تغییر شکل قاب شود؛

پ) مهاربندی دیوار در برابر واژگونی خارج از صفحه، در صورتی که دیوار از قاب جدا شده یا اتصال آن ضعیف باشد.

انتخاب بین ترمیم، جداسازی یا مهاربندی باید بر اساس نقش دیوار، وضعیت قاب، خطر واژگونی، میزان نشست و شرایط بهره‌برداری انجام شود.

۴-۸-۴- تیغه‌ها

دیوارهای گچی، دیوارهای خشکه‌چینی، پارتیشن‌های اداری و دیوارهایی که نقشی در باربری یا مقاومت جانبی ساختمان ندارند، از نظر سازه‌ای در اولویت پایین‌تری نسبت به دیوارهای باربر و اعضای اصلی قرار می‌گیرند. با این حال، این اجزا از نظر ایمنی بهره‌برداران و خطر سقوط قطعات اهمیت دارند.

اگر ترک فقط در گچ، نازک‌کاری، پارتیشن یا دیوار جداکننده داخلی باشد و اسکلت اصلی، دیوارهای باربر و دیوارهای برشی سالم باشند، معمولاً ترمیم سازه‌ای لازم نیست و تمرکز باید بر ایمنی، جلوگیری از ریزش قطعات و حفظ قابلیت بهره‌برداری باشد.

در صورت فعال بودن نشست، پر کردن صلب ترک با ملات سخت یا اپوکسی سخت ممکن است باعث باز شدن مجدد ترک یا ایجاد آسیب در محل دیگر شود. در چنین شرایطی، استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر، پوشش‌های قابل تغییر شکل یا اتصالات لغزشی می‌تواند مناسب‌تر باشد.

اگر قطعات دیوار، گچ، سنگ، کاشی یا پارتیشن در حال جدا شدن باشند، باید برای جلوگیری از سقوط، مهاربندی، جمع‌آوری موضعی یا تعویض قطعات آسیب‌دیده انجام شود. ترمیم نهایی ترک‌های ظاهری باید پس از پایدار شدن روند نشست انجام گیرد.

۴-۸-۵- درب‌ها، چهارچوب‌ها و لولاها

نشست ساختمان می‌تواند باعث کج شدن چهارچوب در، گیرکردن لنگه در، افزایش نیروی باز و بسته شدن، قفل نشدن در یا آسیب به لولاها شود. این موارد معمولاً نشانه تغییر شکل قاب، دیوار اطراف بازشو یا کف ساختمان هستند و باید در کنار سایر علائم نشست بررسی شوند.

در صورت جزئی بودن تغییر شکل، ممکن است تنظیم مجدد لولا، رگلاژ چهارچوب یا استفاده از لولای قابل تنظیم بتواند عملکرد در را به‌طور موقت اصلاح کند. اگر لولا، چهارچوب یا محل اتصال آن دچار آسیب، تغییر شکل دائمی یا خطر جداسازی شده باشد، تعویض یا تقویت آن بهتر است بررسی شود.

تعویض لولا یا تنظیم چهارچوب، علت نشست را برطرف نمی‌کند و فقط عملکرد موضعی در را اصلاح می‌کند؛ بنابراین، در صورت تکرار گیرکردن درها یا افزایش تغییر شکل چهارچوب، باید وضعیت نشست، دیوارهای اطراف بازشو و سازه اصلی بررسی شود.

۴-۹- شرایط خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری و تصمیم به تخریب

با وجود تمام روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی ارائه‌شده در این فصل، در برخی شرایط فنی، اقتصادی یا ایمنی، ساختمان دیگر قابلیت مقاوم‌سازی مؤثر را نداشته و ممکن است خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری و تخریب کنترل‌شده آن ضرورت یابد. تصمیم درباره خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری یا تخریب باید بر اساس ارزیابی هم‌زمان وضعیت سازه،

روند تغییر شکل زمین و ساختمان، امکان کنترل یا کاهش خطر، قابلیت مقاوم‌سازی و توجیه فنی و اقتصادی انجام شود. هیچ‌یک از عوامل زیر، به‌تنهایی و بدون بررسی آثار آن بر ساختمان، شرط کافی برای اتخاذ این تصمیم محسوب نمی‌شود. معیارهای اصلی عبارت‌اند از:

- خرابی شدید و گسترده در سیستم باربر: قرارگیری یک یا چند شاخص ارزیابی در محدوده رده بسیار شدید، یا قرارگیری شاخص‌ها در رده شدید همراه با شواهدی مانند کاهش محسوس ظرفیت باربری، خردشدگی گسترده مصالح، کمانش اعضا، ناپایداری کلی یا خطر ریزش، می‌تواند ضرورت بررسی خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری را مطرح کند.
- آسیب غیرقابل ترمیم در اتصالات اصلی: در سازه‌های فولادی، پارگی گسترده جوش‌ها، بریدگی پیچ‌های پر استحکام یا تسلیم شدید ورق‌های اتصال در اتصالات بحرانی، به‌گونه‌ای که سازه در محدوده آسیب بسیار شدید قرار گرفته و امکان تعویض یا ترمیم مطمئن آن‌ها وجود نداشته باشد.
- تداوم تغییر شکل: فعال بودن فرونشست منطقه‌ای، به‌تنهایی ملاک خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری نیست. در تصمیم‌گیری، مناسب است نرخ فعلی و پیش‌بینی‌شده فرونشست، احتمال کاهش یا توقف آن در اثر اقداماتی مانند مدیریت برداشت و کنترل افت سطح آب زیرزمینی و آثار تغییر شکل‌های محتمل آینده بر ساختمان بررسی شود. در صورتی که پایش و ارزیابی‌های فنی نشان دهند با اجرای تدابیر کنترلی، نرخ فرونشست و تغییر شکل‌های آسیب‌زای ساختمان در محدوده قابل‌قبول تثبیت یا متوقف می‌شوند و ایمنی و قابلیت بهره‌برداری ساختمان قابل تأمین است، ممکن است تخلیه دائمی یا خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری ضرورت نداشته باشد. خروج ساختمان زمانی قابل بررسی است که پیش‌بینی شود، با وجود اقدامات کنترلی و راهکارهای قابل‌اجرای بهسازی و مقاوم‌سازی، تغییر شکل‌های آینده موجب کاهش نامطلوب ایمنی یا قابلیت بهره‌برداری ساختمان خواهند شد.
- شرایط نامناسب بستر زمین: وجود حفره‌های کارستی گسترده، شکاف‌های سطحی زمین یا پدیده‌های زمین‌شناختی که بستر را برای هرگونه پی‌سازی جدید یا مقاوم‌سازی نامناسب سازد.
- عدم توجیه فنی و اقتصادی: چنانچه بررسی فنی و اقتصادی گزینه‌های مقاوم‌سازی و ساخت مجدد نشان دهد که مقاوم‌سازی، با توجه به هزینه اجرای عملیات، نگهداری و تعمیرات آتی، پایش، اسکان موقت، عمر مفید باقی‌مانده ساختمان و خطر گسترش آسیب در آینده، فاقد توجیه کافی است، خروج ساختمان از چرخه بهره‌برداری و تخریب کنترل‌شده آن می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. این تصمیم نباید صرفاً بر اساس مقایسه هزینه اولیه مقاوم‌سازی با هزینه ساخت مجدد اتخاذ شود و لازم است قابلیت دستیابی به سطح ایمنی و بهره‌برداری موردنظر نیز در ارزیابی لحاظ شود.

۴-۹-۱- فرآیند تصمیم‌گیری و اقدامات نهایی

در صورت احراز هر یک از معیارهای فوق، فرایند تصمیم‌گیری و اقدامات نهایی می‌تواند، حسب شرایط پروژه و الزامات مراجع ذی‌صلاح، شامل مراحل زیر باشد:

- تهیه گزارش تفصیلی شامل مستندات آسیب، نتایج پایش، محاسبات فنی و برآورد اقتصادی.
- تشکیل کمیته فنی-حقوقی با حضور نمایندگان مدیریت بحران، شهرداری، مالک یا نماینده وی و حسب نوع و محل پروژه و حدود صلاحیت مراجع ذی‌ربط، نماینده سازمان نظام مهندسی ساختمان و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- تدوین طرح تخریب کنترل شده با رعایت الزامات ایمنی، زیست‌محیطی و همسایگی، شامل باربرداری مرحله‌ای، مهار موقت قبل از تخریب، مدیریت پسماند و ایمنی کارگاه.

تخریب ساختمان در پهنه‌های فرونشست، به معنای پایان مسئولیت مدیریت زمین نیست. حتی پس از تخریب، پایش سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست منطقه‌ای باید ادامه یابد و هرگونه ساخت و ساز جدید منوط به رعایت آخرین نسخه مصوب و ابلاغ‌شده ضوابط و دستورالعمل‌های ساخت و ساز در مناطق دارای فرونشست زمین، BHRC-02-104-00-03، خواهد بود.

فصل ۵

اجرا و پایش

۵-۱- مقدمه

اقدامات مقاوم سازی سازه، بهسازی پی و بستر و ترمیم اجزای آسیب دیده، با هدف کاهش آسیب پذیری ساختمان و مدیریت پیامدهای تغییر شکل زمین انجام می شوند. این اقدامات لزوماً عامل ایجاد فرونشست در مقیاس منطقه ای را برطرف نمی کنند و اثربخشی آن ها به شرایط زمین، روند تغییر شکل، وضعیت آب زیرزمینی و کیفیت طراحی، اجرا و نگهداری وابسته است. راهکار اساسی و پایدار، مدیریت جامع و برنامه ریزی شده برداشت از آبخوان های منطقه، کنترل افت سطح آب زیرزمینی و اجرای سیاست های مؤثر حفاظت و احیای منابع آب زیرزمینی است. از این رو، اجرای عملیات مقاوم سازی در پهنه های دارای فرونشست باید در چارچوب یک فرایند یکپارچه شامل ارزیابی، طراحی، اجرای مرحله ای، کنترل کیفی و پایش انجام شود. جزئیات این فرایند بهتر است متناسب با شرایط هر پروژه و بر اساس نتایج مطالعات سازه ای، ژئوتکنیکی و داده های پایش تعیین گردد.

۵-۲- اصول کلی

اجرا و پایش در ساختمان های واقع در پهنه های دارای فرونشست، اجزای مرتبط یک فرایند واحد محسوب می شوند. پیش از شروع عملیات اجرایی، لازم است برنامه ای متناسب با سطح خطر و اهمیت ساختمان تهیه شود که در آن حداقل موارد زیر مشخص شده باشد:

الف) توالی و مراحل اجرای عملیات؛

ب) تمهیدات پایداری موقت ساختمان؛

پ) روش های کنترل کیفیت و ثبت اطلاعات اجرایی؛

ت) پارامترها و ابزارهای مورد استفاده برای پایش؛

ث) تناوب قرائت و نحوه ثبت و تحلیل داده ها؛

ج) حدود هشدار و شرایط بازنگری یا توقف عملیات؛

چ) مسئولیت عوامل مرتبط در ثبت، بررسی و گزارش نتایج.

تغییرات ایجاد شده در روش یا توالی اجرا باید ثبت شده و حسب اهمیت، با نظر طراح یا مسئول فنی پروژه انجام شود.

۵-۳- برنامه اجرا

عملیات مقاوم سازی و بهسازی باید به صورت مرحله ای و با حفظ پایداری ساختمان در تمامی مراحل انجام شود. توالی عملیات بهتر است با توجه به نوع سیستم سازه ای، مسیر انتقال بار، وضعیت پی، الگوی نشست، شدت آسیب، محدودیت های اجرایی و وضعیت ساختمان های مجاور تعیین گردد.

۵-۳-۱- توالی عملیات

توالی عملیات ترمیم و مقاوم‌سازی بهتر است با توجه به منشأ آسیب، وضعیت زمین و پی، سیستم سازه‌ای، مسیر انتقال بار، روند تغییر شکل و نتایج پایش تعیین شود. پس از اجرای اقدامات ضروری برای تأمین پایداری موقت، می‌توان ابتدا بهسازی خاک و مقاوم‌سازی پی، سپس مقاوم‌سازی اسکلت و اعضای سازه‌ای و در مرحله بعد، ترمیم یا مقاوم‌سازی اجزای غیر سازه‌ای را مورد توجه قرار داد. این ترتیب با هدف ایجاد شرایط تکیه‌گاهی مناسب، تأمین مسیر انتقال بار و کاهش احتمال آسیب مجدد به اجزای ترمیم‌شده پیشنهاد می‌شود (شکل (۵-۱)).

ترتیب یادشده یک قاعده ثابت برای همه ساختمان‌ها محسوب نمی‌شود. در مواردی که ناپایداری عضو سازه‌ای، خطر سقوط اجزای غیر سازه‌ای یا تهدید ایمنی بهره‌برداران وجود داشته باشد، پایداری موقت، مهاربندی یا ایمن‌سازی موضعی می‌تواند پیش از سایر مراحل انجام شود.

برای بررسی اثر مراحل مختلف اجرا بر توزیع نیروها، تغییر شکل‌ها و مسیر انتقال بار، حسب اهمیت و پیچیدگی پروژه، می‌توان از تحلیل‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی، از جمله مدل‌سازی عددی با نرم‌افزارهای مناسب، استفاده کرد. نوع مدل، فرضیات تحلیل و پارامترهای ورودی باید متناسب با اطلاعات موجود، شرایط واقعی ساختمان و سطح عدم قطعیت انتخاب و مستند شود. بر این اساس، ملاحظات مربوط به توالی اجرای هریک از اقدامات مقاوم‌سازی به شرح زیر ارائه می‌شود:

الف) بهسازی پی و خاک زیر آن: عملیات بهسازی پی و بستر باید در قطعات یا مراحل محدود انجام شود تا از ایجاد تغییر ناگهانی در شرایط تکیه‌گاهی و مسیر انتقال بار جلوگیری گردد. ترتیب شروع و پیشروی عملیات می‌تواند بر اساس طرح اجرایی، وضعیت واقعی ساختمان، نتایج تحلیل‌ها و داده‌های پایش تعیین شود.

در موارد لازم، پیش از حفاری، تزریق، پی‌بندی کردن یا ایجاد تغییر در شالوده، باید از مهاربندی، شمع بندی، جک گذاری یا سایر تمهیدات پایداری موقت استفاده شود. باز کردن یا تضعیف هم‌زمان چند ناحیه مجاور، جز در صورت پیش‌بینی و کنترل در طرح اجرایی، توصیه نمی‌شود.

ب) استفاده از ریز شمع: توالی اجرای ریز شمع‌ها باید بر اساس نحوه انتقال بار، محدودیت دسترسی، شرایط زمین و نتایج تحلیل تعیین شود. اجرای ریز شمع‌های پیرامونی پیش از ریز شمع‌های داخلی می‌تواند در برخی پروژه‌ها، در صورت توجیه فنی، مورد استفاده قرار گیرد؛ با این حال، این ترتیب یک قاعده عمومی برای همه ساختمان‌ها محسوب نمی‌شود.

ورود مرحله بعدی عملیات باید پس از حصول مقاومت موردنظر دوغاب، تکمیل اتصال ریز شمع به پی و اطمینان از عملکرد مناسب اجزای اجراشده صورت گیرد.

پ) مقاوم‌سازی اسکلت و اعضای سازه‌ای: مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای باید پس از تأمین شرایط تکیه‌گاهی موردنظر یا هم‌زمان با مراحل کنترل‌شده بهسازی پی، مطابق طرح اجرایی انجام شود. توالی تقویت اعضا باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که در تمام مراحل، مسیر انتقال بار، پایداری موضعی و کلی سازه و ظرفیت اجزای موقت حفظ شود.

ت) ترمیم و مقاوم سازی اجزای غیر سازه‌ای: ترمیم نهایی اجزای غیر سازه‌ای بهتر است پس از اجرای اقدامات اصلی مربوط به پی و سازه و ارزیابی روند تغییر شکل انجام شود تا احتمال بازشدگی مجدد ترک‌ها یا آسیب مجدد کاهش یابد. با این حال، اجزایی که احتمال سقوط، جداسازی یا ایجاد خطر برای بهره‌برداران دارند، باید در مراحل اولیه ایمن سازی، مهار یا جمع‌آوری شوند.

ث) ایجاد درز یا تفکیک بخش‌های ساختمان: ایجاد درز یا تفکیک سازه‌ای تنها در صورتی قابل بررسی است که ضرورت آن بر اساس تحلیل رفتار سازه، الگوی تغییر شکل زمین و وضعیت پی تأیید شده باشد. توالی برش یا جداسازی باید به گونه‌ای تعیین شود که در تمامی مراحل، پایداری هر یک از بخش‌های ساختمان و مسیر انتقال بار آن‌ها حفظ گردد. پیش از اجرای برش نهایی، حسب مورد بهتر است اعضای تقویتی، مهاربندی‌ها، تکیه‌گاه‌های موقت و اتصالات لازم اجرا شده و به ظرفیت موردنظر رسیده باشند.



شکل ۵-۱- فلوچارت توالی عملیات ترمیم و مقاوم سازی

۵-۳-۲- کنترل کیفیت و مستندسازی

کنترل کیفیت عملیات باید متناسب با نوع روش مقاومسازی انجام شود. اطلاعات مربوط به مصالح، تجهیزات، مراحل اجرا، فشار و حجم تزریق، مشخصات حفاری، نتایج آزمایش‌ها، تغییرات ایجادشده در طرح و رخدادهای غیرعادی باید ثبت و نگهداری شود.

پس از پایان عملیات، نقشه‌ها و مشخصات چون‌ساخت، گزارش کنترل کیفیت و خلاصه نتایج پایش حین اجرا بهتر است در مدارک پروژه درج شود.

۵-۴- برنامه پایش

پایش باید متناسب با نوع مخاطره، شدت آسیب، اهمیت ساختمان و روش اجرایی طراحی شود. برنامه پایش می‌تواند سه دوره اصلی را در بر گیرد:

الف) پایش اولیه پیش از شروع عملیات، برای تعیین وضعیت مبنا؛

ب) پایش حین اجرا، برای کنترل اثر عملیات بر ساختمان و زمین؛

پ) پایش پس از اجرا، برای ارزیابی روند تغییر شکل و عملکرد اقدامات انجام‌شده.

پارامترهای مورد پایش و محل نصب ابزارها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که امکان تشخیص تغییرات مهم در پی، سازه و محیط پیرامونی فراهم شود.

۵-۴-۱- ابزارهای پایش

ابزارها و روش‌های پایش، متناسب با شرایط پروژه، می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

الف) ترک سنج؛

ب) نشانه‌های ترازبایی و نقاط مبنا؛

پ) اسکنر لیزری زمینی، در ساختمان‌های مهم یا شرایط خاص؛

ت) پیزومتر، در صورت ضرورت و امکان اجرایی؛

ث) اکستنسومتر یا ابزارهای اندازه‌گیری جابه‌جایی، در صورت نیاز؛

ج) عکس‌برداری دوره‌ای و ثبت مشاهدات ظاهری؛

چ) داده‌های سنجش از دور و تداخل‌سنجی راداری، در صورت دسترسی و مناسب بودن کیفیت داده‌ها.

داده‌های ماهواره‌ای عمدتاً برای ارزیابی روند و الگوی منطقه‌ای فرونشست مناسب‌اند و به‌تنهایی جایگزین اندازه‌گیری‌های موضعی ساختمان نمی‌شوند.

نقاط مبنا باید تا حد امکان، در محلی انتخاب شوند که پایداری نسبی آن‌ها قابل اطمینان باشد. در صورت احتمال حرکت نقاط مبنا، لازم است صحت و پایداری آن‌ها به‌صورت دوره‌ای کنترل شود.

۵-۴-۲- تناوب قرائت

تناوب قرائت نباید صرفاً بر اساس یک فاصله زمانی ثابت تعیین شود، بلکه باید با توجه به نرخ تغییر شکل، اهمیت ساختمان، حساسیت مرحله اجرایی، دقت ابزار و سطح عدم قطعیت تنظیم گردد. در مراحل حساس، مانند حفاری در مجاورت پی، تزریق، انتقال بار، جک گذاری یا برش اعضا، قرائت ها می توانند با تناوب بیشتری انجام شوند. در صورت ثبت روند پایدار و کاهش تغییرات، تناوب قرائت می تواند به تدریج کاهش یابد. هرگونه تغییر در تناوب قرائت باید بر اساس نتایج ثبت شده، نظر مسئول فنی پروژه و شرایط بهره برداری مستند شود.

۵-۴-۳- حدود هشدار و اقدام

پیش از شروع عملیات، لازم است برای پارامترهای اصلی پایش، حدود یا شرایط هشدار متناسب با پروژه تعیین شود. عبور از حدود تعیین شده لزوماً به معنی ناپایداری قطعی ساختمان نیست، اما باید موجب بررسی داده ها، بازدید فنی و ارزیابی مجدد روش اجرا شود.

در صورت مشاهده تغییرات سریع یا غیرعادی، اقدامات زیر می تواند حسب شرایط پروژه انجام شود:

الف) تکرار قرائت و کنترل صحت ابزار؛

ب) افزایش تناوب پایش؛

پ) بازدید فوری از ساختمان و اجزای موقت؛

ت) توقف موقت مرحله مرتبط از عملیات؛

ث) تقویت تمهیدات پایداری موقت؛

ج) اصلاح توالی یا روش اجرا.

۵-۵- پایش پس از اجرا

پایان عملیات اجرایی به تنهایی به معنی تثبیت رفتار ساختمان نیست. پایش پس از اجرا باید برای مدتی ادامه یابد که امکان ارزیابی روند تغییر شکل و عملکرد اقدامات انجام شده فراهم شود.

مدت این دوره باید با توجه به نرخ فرونشست، تغییرات فصلی، اهمیت ساختمان، نوع مداخله، کیفیت داده ها و میزان عدم قطعیت تعیین شود. در ساختمان های واقع در پهنه های دارای فرونشست فعال یا متغیر، ممکن است پایش بلندمدت تری مورد نیاز باشد.

تائید عملکرد اقدامات مقاوم سازی نباید صرفاً بر اساس سپری شدن یک مدت زمانی مشخص انجام شود، بلکه بهتر است بر مبنای مجموعه ای از شواهد، از جمله روند نشست و نشست تفاضلی، تغییرات ترک ها، کج شدگی، وضعیت اعضای سازه ای و عملکرد بهره برداری ساختمان صورت گیرد.

پیوست (الف)

چک لیست های مرحله ای ارزیابی
ساختمان ها

در این پیوست، فرم‌ها و چک‌لیست‌های مورد استفاده در فرایند ارزیابی مرحله‌ای ساختمان‌ها ارائه شده‌اند. منطق انتخاب سطح ارزیابی، شرایط توقف یا ادامه بررسی، نحوه تعیین رده پایه و نهایی خرابی و اثر وضعیت روند تغییرات بر تصمیم‌گیری در بند ۳-۹ بیان شده است.

چک‌لیست‌های این پیوست شامل موارد زیر هستند:

الف) جدول (الف-۱): چک‌لیست غربالگری سریع سطح اول؛

ب) جدول (الف-۲): چک‌لیست ارزیابی نیمه تفصیلی سطح دوم؛

پ) جدول‌های (الف-۳) تا (الف-۵): چک‌لیست‌های ارزیابی تفصیلی تخصصی زمین، پی، سازه و اجزای غیر سازه‌ای؛

ت) جدول (الف-۶): فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب اولیه راهبرد مداخله.

فرم‌ها باید متناسب با شرایط هر ساختمان و بر اساس اطلاعات قابل‌دسترسی تکمیل شوند. در مواردی که تعیین یک شاخص امکان‌پذیر نیست، وضعیت آن به‌صورت نامشخص ثبت شده و نیاز به بررسی تکمیلی در بخش توضیحات درج می‌شود.

الف-۱- سطح اول: چک‌لیست غربالگری سریع

چک‌لیست سطح اول برای شناسایی اولیه نشانه‌های قابل‌مشاهده آسیب و تعیین نیاز به ادامه ارزیابی استفاده می‌شود. این چک‌لیست عمدتاً بر بازدید چشمی، اطلاعات اولیه بهره‌برداری و گزارش ساکنان یا مسئولان نگهداری ساختمان استوار است.

جدول الف-۱- چک‌لیست غربالگری سریع سطح اول

ردیف	شاخص ارزیابی	وضعیت مطلوب	نیازمند بررسی بیشتر
۱	ترک در دیوارها، سقف، کف یا نما	ترک مشاهده نمی‌شود یا ترک بسیار محدود و فاقد شواهد پیش‌رونده بر اساس سوابق و مشاهدات موجود است.	ترک واضح، گسترده، پیش‌رونده یا همراه با بازشدگی قابل توجه مشاهده می‌شود
۲	عملکرد درها و پنجره‌ها	باز و بسته شدن عادی و بدون گیرکردن	گیرکردن مکرر، تغییر شکل چهارچوب یا اختلال محسوس در باز و بسته شدن وجود دارد
۳	وضعیت تراز کف	شیب، افتادگی یا اختلاف تراز محسوس مشاهده نمی‌شود	شیب، افتادگی، پله شدگی یا اختلاف تراز قابل تشخیص وجود دارد
۴	راستای دیوار، ستون یا نما	کج شدگی یا تغییر راستای محسوس مشاهده نمی‌شود	کج شدگی، انحراف از راستا یا تغییر شکل قابل مشاهده وجود دارد
۵	وضعیت محوطه پیرامونی	شکاف، نشست موضعی یا فروریزش مشاهده نمی‌شود	شکاف زمین، نشست موضعی، حفره سطحی یا تغییر شکل محوطه مشاهده می‌شود
۶	وضعیت تأسیسات، لوله‌ها یا کف‌سازی	شکستگی، نشستی، جداشدگی یا تغییر شیب مشاهده نمی‌شود	شکستگی، نشستی، جداشدگی، تغییر شیب یا آسیب تکرارشونده مشاهده می‌شود
۷	سابقه تغییرات در زمان بهره‌برداری	افزایش ترک، نشست یا تغییر شکل گزارش نشده است	افزایش ترک، نشست و گیرکردن اجزا توسط ساکنان یا بهره‌برداران گزارش شده است

نتیجه سطح اول: در صورتی که هیچ‌یک از موارد ستون سوم (نیازمند بررسی بیشتر) مشاهده یا گزارش نشود، ارزیابی می‌تواند در سطح اول متوقف شود و نتیجه همراه با برنامه پایش دوره‌ای ثبت گردد. در صورت مشاهده یا گزارش حداقل یک مورد از موارد ستون سوم (نیازمند بررسی بیشتر)، وجود چند نشانه خفیف یا نامشخص، یا گزارش افزایش آسیب در طول زمان، جدول (الف-۲) تکمیل می‌شود.

الف-۲- سطح دوم: چک‌لیست ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب

چک‌لیست سطح دوم برای ثبت مشخصات آسیب، نقش جزء آسیب‌دیده، علائم همراه، اثر آسیب بر بهره‌برداری و بررسی مقدماتی احتمال ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سازه استفاده می‌شود.

جدول الف - ۲ - چک‌لیست ارزیابی نیمه تفصیلی آسیب

ردیف	شاخص ارزیابی	اطلاعات مورد نیاز
۱	محل ترک	دیوار باربر، دیوار جداکننده، تیر، ستون، سقف، کف، نما، شالوده
۲	جهت ترک	قائم، افقی، مورب، پله‌ای، شعاعی، نامنظم
۳	پهنای تقریبی ترک	کمتر از ۱ میلی‌متر، ۱ تا ۵ میلی‌متر، ۵ تا ۱۵ میلی‌متر، بیش از ۱۵ میلی‌متر
۴	تکرار ترک	منفرد، چندگانه، تکرارشونده در چند طبقه یا چند دهانه
۵	عبور ترک از عضو باربر	بله / خیر / نامشخص
۶	وجود جابه‌جایی نسبی دو طرف ترک	بله / خیر
۷	وجود خردشدگی، لهیدگی یا کمانش	بله / خیر
۸	نشانه فعال بودن ترک	افزایش پهنای، افزایش طول، ایجاد شاخه جدید، گزارش ساکنان
۹	اثر بر بهره‌برداری	گیرکردن در و پنجره، شیب کف، نشست تأسیسات، جداشدگی نما
۱۰	نیاز به پایش ابزار دقیق	ندارد، ترک سنج، ترازیابی، پایش ترکیبی

نتیجه سطح دوم: در صورتی که آسیب محدود به اجزای غیر سازه‌ای باشد، منشأ آن با اطمینان کافی مشخص شود، شواهدی از ارتباط آن با حرکت زمین، پی یا سازه وجود نداشته باشد و ایمنی بهره‌برداران تحت تأثیر قرار نگیرد، ارزیابی می‌تواند در سطح دوم ادامه یابد و ترمیم موضعی و پایش مورد بررسی قرار گیرد.

در صورت مشاهده آسیب در پی یا عضو باربر، آسیب متوسط یا شدید، تغییر شکل پیش‌رونده، ترک فعال در عضو باربر، منشأ نامشخص آسیب یا شواهد ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سازه، ارزیابی مطابق جدول‌های (الف-۳) تا (الف-۵) به سطح سوم توسعه می‌یابد.

الف-۳ - سطح سوم: چک‌لیست ارزیابی تفصیلی تخصصی

در سطح سوم، وضعیت زمین و محیط پیرامونی، پی و شالوده، سازه و اجزای غیر سازه‌ای بر اساس شرایط ساختمان و شواهد موجود بررسی می‌شود.

الف-۳-۱ - بخش زمین و محیط پیرامونی

ارزیابی وضعیت زمین و محیط پیرامونی ساختمان در سطح سوم مطابق جدول (الف-۳) انجام می‌شود.

جدول الف - ۳ - چک لیست ارزیابی تفصیلی زمین و محیط پیرامونی

ردیف	شاخص ارزیابی زمین	وضعیت/توضیحات
۱	قرارگیری ساختمان در پهنه فرونشست منطقه ای	بله / خیر / نیازمند بررسی
۲	وجود داده های سنجش از راه دور، ترازابی یا نقشه پهنه بندی	موجود / ناموجود
۳	نرخ فرونشست منطقه ای	مقدار گزارش شده: میلی متر در سال؛ دامنه: کمتر از ۱۰ (خفیف) / ۱۰ تا ۳۰ (کم) / ۳۰ تا ۶۰ (متوسط) / ۶۰ تا ۱۰۰ (زیاد) / بیش از ۱۰۰ میلی متر در سال (بسیار زیاد) دوره زمانی برآورد:؛ منبع داده: ترازابی / سنجش از دور / نقشه یا گزارش مرجع / سایر:؛ روند: افزایشی / تقریباً ثابت / کاهشی / نامشخص
۴	وجود شکاف کششی در زمین یا محوطه	بله / خیر
۵	وجود حفره، فروریزش یا نشست موضعی اطراف ساختمان	بله / خیر
۶	شواهد نشت آب، فاضلاب یا تغییر رطوبت خاک	بله / خیر
۷	گودبرداری، حفاری یا بارگذاری جدید در مجاورت	بله / خیر
۸	احتمال تفکیک فرونشست منطقه ای از نشست موضعی	قابل تفکیک / نیازمند مطالعه تکمیلی

الف-۳-۲- بخش پی

ارزیابی وضعیت پی و شالوده ساختمان در سطح سوم مطابق جدول (الف-۴) انجام می شود.

جدول الف - ۴ - چک لیست ارزیابی تفصیلی پی و شالوده

ردیف	شاخص ارزیابی پی	وضعیت / توضیحات
۱	نوع پی	منفرد، نواری، گسترده، عمیق، نامشخص
۲	وجود ترک در شالوده یا کلاف ها	بله / خیر / نامشخص
۳	نشست موضعی کف یا اطراف ستون ها	بله / خیر / نامشخص
۴	جداشدگی کف از دیوار یا ستون	بله / خیر / نامشخص
۵	اختلاف تراز قابل اندازه گیری در پی یا کف	بله / خیر / نامشخص
۶	احتمال کاهش تماس پی با خاک	کم / متوسط / زیاد / نامشخص
۷	نیاز به بررسی ژئوتکنیکی تکمیلی	بله / خیر
۸	نیاز احتمالی به بهسازی پی	ندارد / موضعی / گسترده

الف-۳-۳- بخش سازه و اجزای غیر سازه ای

ارزیابی وضعیت سازه و اجزای غیر سازه ای ساختمان در سطح سوم مطابق جدول (الف-۵) انجام می شود.

جدول الف - ۵ - چک لیست ارزیابی تفصیلی سازه و اجزای غیر سازه ای

ردیف	شاخص ارزیابی سازه	وضعیت / توضیحات
۱	نوع سیستم سازه ای	بنایی، بتن آرمه، فولادی
۲	آسیب در اعضای باربر اصلی	ندارد / تیر / ستون / دیوار باربر / دیوار برشی
۳	نوع ترک غالب	خمشی، برشی، کششی، فشاری، نامشخص
۴	وجود ترک مورب یا پله ای در دیوارها	بله / خیر
۵	وجود خردشدگی، لهیدگی یا پوسته شدگی	بله / خیر
۶	کج شدگی ستون یا دیوار	بله / خیر
۷	آسیب اتصال تیر به ستون، دیوار به سقف یا دیوار به قاب	بله / خیر
۸	آسیب اجزای غیر سازه ای و خطر سقوط	کم / متوسط / زیاد
۹	نیاز به مقاوم سازی سازه ای	ندارد / موضعی / گسترده
۱۰	نیاز به اقدام اضطراری	ندارد / پایدارسازی موقت / تخلیه موقت

الف-۴- قاعده تصمیم‌گیری برای توقف یا ادامه ارزیابی

قاعده استفاده از چک‌لیست‌های این پیوست به شرح زیر است:

۱. در صورت نبود نشانه قابل توجه در جدول (الف-۱)، نتیجه سطح اول و برنامه پایش دوره‌ای ثبت می‌شود.
۲. در صورت مشاهده حداقل یک مورد نیازمند بررسی بیشتر در جدول (الف-۱)، جدول (الف-۲) تکمیل می‌شود.
۳. در صورتی که در سطح دوم، آسیب محدود و غیر سازه‌ای باشد و نبود ارتباط آن با حرکت زمین، پی یا سازه با شواهد کافی تأیید شود، ارزیابی می‌تواند در همین سطح ادامه یابد.
۴. در صورت مشاهده آسیب در پی یا عضو باربر، آسیب متوسط یا بالاتر، تغییر شکل پیش‌رونده، ترک فعال در عضو باربر، منشأ نامشخص آسیب، علائم ناپایداری یا احتمال ارتباط آسیب با حرکت زمین، پی یا سازه، جدول‌های سطح سوم تکمیل می‌شوند.
۵. پس از پایان آخرین سطح مورد نیاز، نتایج در جدول (الف-۶) جمع‌بندی می‌شوند.
۶. در صورت تغییر وضعیت ساختمان، افزایش شاخص‌های آسیب یا ظهور علائم جدید، سطح ارزیابی و رده خرابی بازنگری می‌شود.

الف-۵- فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی

- پس از تکمیل سطح دوم یا سطح سوم، نتایج ارزیابی در جدول (الف-۶) ثبت می‌شوند. برای ساختمان‌هایی که در سطح اول فاقد آسیب قابل توجه تشخیص داده می‌شوند، ثبت نتیجه غربالگری و برنامه پایش دوره‌ای کافی است.
- در فرم جمع‌بندی، وضعیت تغییرات زمین، حرکت پی یا ساختمان و فعالیت ترک‌ها به صورت مستقل ثبت می‌شود. فعال بودن یکی از این موارد لزوماً به معنی فعال بودن سایر موارد نیست. همچنین، وضعیت غیرفعال فقط به دوره و دقت پایش انجام‌شده مربوط است.
- رده پایه خرابی بر اساس شدیدترین نتیجه معتبر حاصل از پهنای ترک، دوران نسبی و کرنش افقی تعیین می‌شود. سپس نوع عضو، نقش سازه‌ای یا غیر سازه‌ای، سازوکار خرابی و علائم همراه برای تعیین رده نهایی مورد توجه قرار می‌گیرند.

جدول الف - ۶ - فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاومسازی

ردیف	بخش	موارد قابل ثبت
۱	مشخصات ساختمان	کد ساختمان: نشانی: نوع سازه: تعداد طبقات: نوع پی: کاربری: تاریخ بازدید: نام بازرسی یا مهندس ارزیاب:
۲	نتیجه ارزیابی مرحله‌ای	آخرین سطح تکمیل‌شده: سطح اول / سطح دوم / سطح سوم علت توقف یا ادامه ارزیابی: در صورت تکمیل سطح سوم، بخش‌های بررسی‌شده: زمین / پی / سازه بحرانی‌ترین بخش شناسایی‌شده: زمین / پی / سازه / اجزای غیر سازه‌ای
۳	خلاصه وضعیت آسیب بحرانی	بیشترین پهنای ترک مشاهده‌شده: محل ترک بحرانی: عضو درگیر: ترک در عضو باربر مشاهده شده است: بله / خیر جابه‌جایی نسبی دو طرف ترک وجود دارد: بله / خیر خردشدگی، لهیدگی یا پوسته شدگی مصالح وجود دارد: بله / خیر کج شدگی دیوار یا ستون وجود دارد: بله / خیر نشست کف یا اختلاف تراز مشاهده شده است: بله / خیر
۴	خلاصه پارامترهای تغییر شکل	مقدار دوران نسبی: مقدار کرنش افقی: جهت غالب کرنش: مقدار نشست تفاضلی: نرخ نشست:

ادامه جدول الف - ۶- فرم جمع‌بندی نهایی ارزیابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی

ردیف	بخش	موارد قابل ثبت
۵	وضعیت روند تغییرات	وضعیت فرونشست یا تغییر شکل زمین در محدوده ساختمان: فعال / غیرفعال / نامشخص وضعیت حرکت پی یا ساختمان: فعال / غیرفعال / نامشخص نوع حرکت پی یا ساختمان: نشست / کج شدگی / اعوجاج / جابه‌جایی افقی / ترکیبی / نامشخص وضعیت ترک یا ترک‌های شاخص: فعال / غیرفعال / نامشخص مبنای تشخیص: ترک سنج / ترازبایی / کنترل کج شدگی / اندازه‌گیری جابه‌جایی / داده‌های سنجش از دور / مشاهدات دوره‌ای / سایر مدت دوره پایش: تناوب اندازه‌گیری: خلاصه تغییرات ثبت‌شده و مستندات مربوط:
۶	تعیین رده خرابی	رده بر اساس پهنای ترک: رده بر اساس دوران نسبی: رده بر اساس کرنش افقی: رده خرابی حاصل از تحلیل عددی، در صورت انجام: رده نهایی خرابی: دلیل انتخاب رده نهایی:
۷	راهبرد مقاوم‌سازی پیشنهادی	پایش بدون مداخله / ترمیم غیر سازه‌ای / ترمیم ترک‌های غیرفعال / استفاده از درزگیر یا اتصال انعطاف‌پذیر / مقاوم‌سازی عضو سازه‌ای / بهسازی پی / اجرای ریز شمع یا شمع فشاری / شناژ بندی یا یکپارچه‌سازی شالوده / ایجاد درز انقطاع / تخلیه یا شمع بندی اضطراری / تخریب کنترل شده
۸	اقدامات فوری	نیاز به تخلیه موقت: بله / خیر نیاز به شمع بندی یا مهاربندی اضطراری: بله / خیر نیاز به جمع‌آوری اجزای غیر سازه‌ای خطرناک: بله / خیر نیاز به توقف منبع نشست یا نشست آب: بله / خیر نیاز به بررسی ژئوتکنیکی تکمیلی: بله / خیر نیاز به پایش بیشتر پیش از مداخله: بله / خیر نیاز به پایدارسازی موقت: بله / خیر

برای روشن‌تر شدن نحوه استفاده از چک‌لیست و ماتریس تصمیم‌گیری، یک مثال حل شده از ارزیابی ساختمان آسیب‌دیده و انتخاب راهبرد مقاومت‌سازی در پیوست ب ارائه شده است.

پیوست (ب)

مثال ارزیابی و انتخاب راهبرد

مقاوم سازی ساختمان آسیب دیده در

پهنه فرونشست

ب-۱- مثال اول: ارزیابی و انتخاب راهبرد مداخله برای ساختمان بنایی با رده خرابی متوسط

ب-۱-۱- معرفی ساختمان نمونه

ساختمان مورد بررسی یک ساختمان بنایی دو طبقه با کاربری مسکونی است که در یک پهنه دارای سابقه فرونشست زمین قرار دارد. سیستم باربر قائم ساختمان شامل دیوارهای بنایی باربر و سقف تیرچه بلوک است. پی ساختمان از نوع شالوده نواری کم عمق بوده و در زمان ساخت، تمهیدات ویژه‌ای برای مقابله با نشست غیریکنواخت در نظر گرفته نشده است.

بر اساس گزارش اولیه مالک، طی چند ماه اخیر ترک‌هایی در دیوارهای طبقه همکف و طبقه اول مشاهده شده و برخی درها و پنجره‌ها به سختی باز و بسته می‌شوند. همچنین در بخشی از کف طبقه همکف، اختلاف تراز محسوس گزارش شده است.

ب-۱-۲- مشاهدات میدانی

در بازدید میدانی، نشانه‌های زیر مشاهده شد:

- وجود ترک‌های مورب و پله‌ای در دیوارهای بنایی اطراف بازشوها؛
 - وجود ترک قائم نسبتاً پیوسته در یکی از دیوارهای طولی طبقه همکف؛
 - گیرکردن در ورودی و یکی از پنجره‌های ضلع جنوبی ساختمان؛
 - اختلاف تراز قابل مشاهده در کف طبقه همکف؛
 - جداسازی موضعی آندود در محل اتصال دیوار به سقف؛
 - نبود خردشدگی گسترده مصالح، ریزش دیوار یا کمانش آشکار اعضا.
- با توجه به عبور برخی ترک‌ها از دیوارهای باربر و مشاهده نشانه‌های تغییر شکل کلی، آسیب‌ها صرفاً معماری تلقی نشده و ارزیابی تفصیلی ضروری تشخیص داده شد.

ب-۱-۳- داده‌های اندازه‌گیری شده

پس از برداشت میدانی، اندازه‌گیری‌های جدول (ب-۱) ثبت شد.

جدول ب-۱- داده‌های اندازه‌گیری شده در بازدید میدانی ساختمان نمونه

مقدار اندازه‌گیری شده	شاخص مورد بررسی
۸ میلی‌متر	بیشترین پهنای ترک در دیوار باربر
۴۰ میلی‌متر	اختلاف نشست بین دو نقطه شاخص کف
۶ متر	فاصله افقی بین دو نقطه اندازه‌گیری نشست
افزایش پهنای حدود ۱ میلی‌متر	وضعیت ترک‌ها طی دو ماه پایش اولیه
اختلال محدود در باز و بسته شدن درها و پنجره‌ها	وضعیت بهره‌برداری

ب-۱-۴- محاسبه شاخص‌های ارزیابی

دوران نسبی از نسبت اختلاف نشست به فاصله افقی بین دو نقطه محاسبه می‌شود:

اختلاف نشست ۴۰ میلی‌متر و فاصله افقی ۶۰۰۰ میلی‌متر بنابراین: دوران نسبی $= 6000 \div 40 = 0.067$
این مقدار تقریباً معادل است با:

دوران نسبی $\approx 1/150$

بنابراین، مقدار دوران نسبی ساختمان در محدوده آسیب متوسط قرار می‌گیرد.

ب-۱-۵- تحلیل نوع آسیب

با توجه به الگوی ترک‌ها و محل وقوع آن‌ها، آسیب‌های مشاهده شده به شرح زیر تحلیل می‌شوند:

۱. ترک‌های مورب و پله‌ای اطراف بازشوها نشان دهنده ایجاد تغییر شکل برشی در دیوارهای بنایی است. این نوع ترک‌ها معمولاً در اثر نشست تفاضلی یا تغییر شکل نسبی پی و دیوار ایجاد می‌شوند.
۲. ترک قائم نسبتاً پیوسته در دیوار طولی می‌تواند با کرنش کششی افقی زمین یا بازشدگی نسبی بخش‌های ساختمان سازگار باشد. با این حال، به دلیل نبود طول مبنای اندازه‌گیری و داده مربوط به تغییر فاصله میان نقاط مشخص، مقدار کرنش افقی و انتساب قطعی ترک به آن قابل تعیین نیست.
۳. گیرکردن درها و پنجره‌ها نشانه‌ای از تغییر شکل قاب بازشوها و تغییر هندسه دیوارها است. این موضوع بیشتر با نشست غیریکنواخت و چرخش موضعی ساختمان سازگار است.
۴. جداشدگی اندود در محل اتصال دیوار به سقف، اگرچه به تنهایی یک آسیب غیر سازه‌ای محسوب می‌شود، اما در کنار سایر علائم می‌تواند نشانه تغییر شکل کلی ساختمان باشد.
۵. افزایش پهنای ترک‌ها طی دوره پایش اولیه نشان می‌دهد که آسیب‌ها فعال هستند و ترمیم نهایی ترک‌ها بدون کنترل یا پایش روند نشست توصیه نمی‌شود.

ب-۱-۶- تعیین رده خرابی بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری

برای تعیین سطح خرابی، شاخص‌های اصلی با ماتریس تصمیم‌گیری مطابق جدول (ب-۲) مقایسه می‌شوند.

جدول ب-۲- مقایسه شاخص‌های آسیب با ماتریس تصمیم‌گیری و تعیین رده خرابی ساختمان

شاخص	مقدار به دست آمده	تفسیر
بیشترین پهنای ترک	۸ میلی‌متر	آسیب متوسط
دوران نسبی	حدود ۱/۱۵۰	آسیب متوسط
فعال بودن ترک‌ها	فعال	نیازمند پایش و احتیاط در مداخله
کرنش افقی	نامشخص؛ طول مبنای اندازه‌گیری موجود نیست	در تعیین کمی رده خرابی استفاده نمی‌شود
نوع عضو آسیب‌دیده	دیوار باربر و اجزای غیر سازه‌ای	دارای اهمیت سازه‌ای
علائم همراه	گیرکردن بازشوها و اختلاف تراز کف	بیانگر تغییر شکل نسبی ساختمان

با توجه به اینکه کرنش افقی قابل محاسبه نبوده است، رده پایه خرابی در این مثال بر اساس پهنای ترک و دوران نسبی تعیین می‌شود. هر دو شاخص در محدوده آسیب متوسط قرار دارند؛ زیرا بیشترین پهنای ترک ۸ میلی‌متر و دوران نسبی حدود ۱/۱۵۰ است. مشاهده ترک در دیوار باربر و وجود علائمی مانند گیرکردن بازشوها و اختلاف تراز کف، اهمیت سازه‌ای آسیب و ضرورت بررسی تکمیلی را تأیید می‌کند، اما شواهد موجود برای قرار دادن ساختمان در رده شدید یا بسیار شدید کافی نیست.

فعال بودن ترک‌ها به‌تنهایی موجب ارتقای رده خرابی نمی‌شود، ولی موجب افزایش فوریت پایش، ضرورت بررسی وضعیت پی و بستر، احتیاط در انتخاب روش ترمیم و اجرای مرحله‌ای مداخله می‌شود. بر این اساس، رده نهایی خرابی ساختمان در زمان ارزیابی، متوسط تعیین می‌شود. در صورت افزایش پهنای ترک، دوران نسبی یا ظهور علائم جدید، رده خرابی باید مجدداً تعیین شود.

ب-۱-۷- راهبرد مقاوم‌سازی پیشنهادی

با توجه به قرارگیری ساختمان در رده خرابی متوسط، راهبرد پیشنهادی بهتر است ترکیبی از پایش، کنترل تغییر شکل، ترمیم ترک‌ها و مقاوم‌سازی موضعی باشد. اقدامات زیر توصیه می‌شود:

الف) اقدامات فوری و پایش

- نصب ترک سنج روی ترک‌های شاخص در دیوارهای باربر؛
- انجام ترازبایی دوره‌ای نقاط کف و پی؛
- ثبت عکس‌های دوره‌ای از ترک‌ها با مقیاس ثابت؛

- پایش حداقل سه تا شش ماهه برای تشخیص روند افزایش یا کاهش نشست (این مدت صرفاً برای مثال است و می تواند تغییر کند).

تا زمانی که فعال بودن نشست تأیید یا رد نشده است، ترمیم نهایی ترک ها با مصالح سخت و شکننده توصیه نمی شود.

(ب) بررسی تکمیلی پی و بستر

- بررسی وضعیت شالوده نواری در محل دیوارهای دارای ترک؛
- شناسایی احتمال وجود حفره، شسته شدگی یا سستی موضعی خاک زیر پی؛
- کنترل نشی آب، فاضلاب یا زهکشی نامناسب در اطراف ساختمان؛
- انجام مطالعات ژئوتکنیکی موضعی در صورت مشاهده ادامه نشست یا افزایش ترک ها.

(پ) اقدامات مقاومسازی و ترمیم

در صورت کاهش نرخ نشست و نبود نشانه های خطر فوری، اقدامات زیر قابل انجام است:

- ترمیم ترک های غیرفعال با روش مناسب، مانند تزریق دوغاب یا ملات ترمیمی متناسب با نوع مصالح؛
- اجرای کلاف بندی یا تقویت موضعی دیوارهای بنایی آسیب دیده؛
- تقویت نواحی اطراف بازشوها برای کاهش تمرکز تنش؛
- بهسازی اتصال دیوارها به سقف؛
- اصلاح درزها و جداسدگی های غیر سازه ای پس از اطمینان از کاهش روند تغییر شکل؛
- در صورت تأیید ضعف موضعی زیر پی، اجرای تزریق کنترل شده در محدوده مؤثر زیر شالوده، همراه با پایش نشست و ترک ها.

(ت) محدودیت های اجرایی

با توجه به فعال بودن ترک ها، هرگونه مداخله باید مرحله ای و همراه با پایش انجام شود. در صورت افزایش سریع پهنای ترک ها، تشدید اختلاف تراز کف، افزایش کج شدگی دیوارها یا ظهور خردشدگی مصالح، ارزیابی ساختمان باید مجدداً انجام شده و احتمال ارتقای رده خرابی به سطح شدید بررسی شود.

ب-۱-۸- جمع بندی نتیجه مثال

در این مثال، ساختمان مورد بررسی بر اساس بیشترین پهنای ترک، برابر با ۸ میلی متر و دوران نسبی حدود ۱/۱۵۰، در رده خرابی متوسط قرار گرفت. فعال بودن ترک ها موجب تغییر خودکار رده خرابی نشد، اما بر فوریت اقدام، تناوب پایش، توالی مداخله و ضرورت بازنگری ارزیابی اثر گذاشت.

بنابراین، راهبرد مناسب برای این ساختمان شامل پایش منظم، بررسی وضعیت پی و بستر، ترمیم کنترل شده ترک ها، تقویت موضعی دیوارهای باربر و در صورت نیاز، بهسازی محدود پی است.

ب-۲- مثال دوم: ارزیابی و انتخاب راهبرد مداخله برای سوله صنعتی با دیوارهای بنایی با رده خرابی بسیار شدید

ب-۲-۱- معرفی ساختمان نمونه

ساختمان مورد بررسی یک سوله صنعتی یک طبقه با دیوارهای بنایی باربر است که در پهنه‌ای با سابقه فرونشست زمین قرار دارد. بر اساس اطلاعات موجود، سوله طی سال‌های اخیر در معرض تغییر شکل زمین قرار داشته و در ماه‌های اخیر افزایش آسیب در دیوارهای بنایی گزارش شده است. به منظور بررسی وضعیت سوله، بازدید میدانی، برداشت ترک‌ها، کنترل تراز پی‌ها و کف سوله و ارزیابی روند تغییر شکل انجام شد. شکل (ب-۱) نمونه‌ای از ترک خوردگی در دیوار بنایی و پی در اثر برداشت آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ب-۱- ترک خوردگی در سوله صنعتی ناشی از فرونشست زمین (اشتهارد)

ب-۲-۲- مشاهدات میدانی

در بازدید میدانی، نشانه‌های زیر مشاهده شد:

- گیر کردن یا اختلال در عملکرد درهای صنعتی و کرکره‌ها؛
- وجود ترک‌های قائم و مورب پیوسته در برخی دیوارهای باربر؛
- مشاهده جابه‌جایی نسبی در دو طرف برخی ترک‌ها؛
- کج‌شدگی محسوس برخی دیوارهای بنایی پیرامونی؛
- تغییر تراز کف صنعتی و ایجاد اختلاف ارتفاع در کف؛
- جداسازی موضعی اندود و اجزای غیر سازه‌ای؛
- وجود علائم خردشدگی موضعی مصالح در محدوده برخی ترک‌های دیوار باربر؛
- افزایش قابل توجه پهنای ترک‌ها در دوره پایش اولیه.

با توجه به وجود آسیب در دیوارهای باربر، تغییر شکل محسوس ساختمان، فعال بودن ترک‌ها و مشاهده علائم همراه، آسیب مشاهده‌شده صرفاً معماری یا غیر سازه‌ای تلقی نشده و انجام ارزیابی تفصیلی و اتخاذ اقدامات احتیاطی پیش از ادامه بهره‌برداری ضروری تشخیص داده شد.

ب-۲-۳- داده‌های اندازه‌گیری شده

پس از برداشت میدانی، اندازه‌گیری‌های جدول (ب-۳) ثبت شد.

جدول ب-۳- داده‌های اندازه‌گیری شده در بازدید میدانی ساختمان نمونه دوم

شاخص مورد بررسی	مقدار اندازه‌گیری شده
بیشترین پهنای ترک در دیوار بنایی	۵۰ میلی‌متر
اختلاف نشست بین دو نقطه	۱۲۰ میلی‌متر
فاصله افقی بین دو نقطه	۶ متر
تغییر پهنای ترک طی دوره پایش اولیه	حدود ۳ میلی‌متر
وضعیت بهره‌برداری	اختلال شدید در باز و بسته شدن بازشوها و محدودیت بهره‌برداری از برخی فضاها
وضعیت ترک‌ها	فعال
کج شدگی دیوار	محسوس

ب-۲-۴- محاسبه شاخص‌های ارزیابی

اختلاف نشست ۱۲۰ میلی‌متر و فاصله افقی ۶۰۰۰ میلی‌متر بنابراین: دوران نسبی $= ۱۲۰ \div ۶۰۰۰ = ۰/۰۲$

این مقدار تقریباً معادل است با ۱/۵۰ و در محدوده آسیب بسیار شدید قرار می‌گیرد.

همچنین، بیشترین پهنای ترک در دیوار باربر برابر با ۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. بر اساس ماتریس تعیین رده پایه آسیب، این مقدار در محدوده آسیب بسیار شدید قرار می‌گیرد. فعال بودن ترک‌ها و افزایش پهنای آن‌ها در دوره پایش نیز نشان‌دهنده ادامه تغییر شکل و ضرورت توجه فوری به وضعیت ساختمان است.

ب-۲-۵- تحلیل نوع آسیب

با توجه به الگوی آسیب و داده‌های اندازه‌گیری شده، وضعیت ساختمان به شرح زیر ارزیابی می‌شود:

- ترک‌های مورب و پلکانی گسترده در دیوارهای باربر با تغییر شکل نسبی و نشست غیریکنواخت ساختمان سازگار هستند.
- اختلاف نشست اندازه‌گیری شده و دوران نسبی حاصل از آن نشان‌دهنده تغییر شکل قابل‌توجه ساختمان و ایجاد شرایط نامطلوب برای دیوارهای باربر است.
- وجود جابه‌جایی نسبی در دو طرف برخی ترک‌ها و افزایش پهنای ترک در دوره پایش اولیه، فعال بودن آسیب را تأیید می‌کند.

- کج‌شدگی دیوار و وجود خردشدگی موضعی مصالح نشان می‌دهد که تغییر شکل زمین بر عملکرد دیوارهای باربر سوله اثر گذاشته است.
- اختلال شدید در بهره‌برداری، همراه با تغییر شکل ساختمان و آسیب در دیوارهای باربر، ضرورت محدودسازی بهره‌برداری و بررسی ایمنی پیش از ادامه استفاده عادی از ساختمان را نشان می‌دهد.

ب-۲-۶- تعیین رده خرابی بر اساس ماتریس تصمیم‌گیری

برای تعیین رده خرابی، شاخص‌های کمی، نوع عضو آسیب‌دیده، سازوکار محتمل خرابی، وضعیت روند تغییرات و علائم همراه در نظر گرفته می‌شوند (جدول (ب-۴)).

جدول ب-۴- مقایسه شاخص‌های آسیب با ماتریس تصمیم‌گیری و تعیین رده خرابی

شاخص	مقدار به‌دست‌آمده	تفسیر
بیشترین پهنای ترک	۵۰ میلی‌متر	آسیب بسیار شدید
دوران نسبی	حدود ۱/۵۰	آسیب بسیار شدید
وضعیت ترک‌ها	فعال	افزایش فوریت مداخله
نوع عضو آسیب‌دیده	دیوارهای باربر	دارای اهمیت سازه‌ای
کج‌شدگی دیوار	محسوس	نشانه تغییر شکل و احتمال ناپایداری
خردشدگی مصالح	موضعی	نیازمند بررسی ظرفیت و پایداری
وضعیت بهره‌برداری	اختلال شدید	محدودسازی بهره‌برداری ضروری
رده پایه خرابی	بسیار شدید	-

با توجه به اینکه بیشترین پهنای ترک و دوران نسبی هر دو در محدوده آسیب بسیار شدید قرار دارند و این شاخص‌ها با آسیب در دیوارهای باربر، کج‌شدگی، خردشدگی موضعی و فعال بودن ترک‌ها همراه هستند، رده نهایی خرابی ساختمان در این مثال بسیار شدید تعیین می‌شود. وجود این علائم، ضرورت اتخاذ اقدامات فوری برای تأمین ایمنی و جلوگیری از گسترش آسیب را نشان می‌دهد.

ب-۲-۷- اقدامات فوری و اضطراری

با توجه به رده بسیار شدید خرابی و وجود علائم ناپایداری، ادامه بهره‌برداری عادی از ساختمان تا زمان تکمیل ارزیابی ایمنی توصیه نمی‌شود. اقدامات اولیه زیر باید در دستور کار قرار گیرد:

- محدودسازی یا توقف موقت بهره‌برداری از بخش‌های آسیب‌دیده؛
- در صورت تأیید خطر برای ایمنی کارکنان و افراد حاضر، تخلیه موقت ساختمان؛
- جلوگیری از ورود افراد غیرمسئول به محدوده‌های دارای خطر سقوط یا ناپایداری؛
- جمع‌آوری یا مهار اجزای غیر سازه‌ای دارای خطر سقوط؛

- اجرای پایدارسازی موقت و مهاربندی دیوارهای دارای کج شدگی یا خطر ناپایداری؛
 - استفاده از جک، شمع بندی یا سایر تمهیدات موقت در محل هایی که احتمال افتادگی یا از دست رفتن مسیر انتقال بار وجود دارد؛
 - نصب ابزارهای پایش ترک و کنترل تراز و تغییر شکل ساختمان؛
 - بررسی فوری وضعیت پی، بستر و شرایط زمین زیر ساختمان؛
 - بررسی وجود نشست آب، شسته شدگی یا سستی موضعی خاک در اطراف و زیر پی.
- پایدارسازی موقت باید بر اساس طرح مهندسی و متناسب با وضعیت واقعی ساختمان اجرا شود و جایگزین ارزیابی و مداخله نهایی نیست.

ب-۲-۸- راهبرد مقاومسازی و بهسازی پیشنهادی

پس از تأمین پایداری موقت و انجام بررسی های لازم، راهبرد دائمی مداخله باید بر اساس منشأ آسیب، وضعیت پی و بستر و ظرفیت باقیمانده ساختمان تعیین شود.

در این مثال، با توجه به شدت آسیب و احتمال تداوم تغییر شکل، راهبرد ترکیبی شامل بهسازی پی و بستر و تقویت ساختمان مورد توجه قرار می گیرد. در صورتی که بررسی ژئوتکنیکی و سازه ای نشان دهد که شالوده موجود توان انتقال ایمن بار را ندارد یا تغییر شکل بستر عامل اصلی آسیب است، اجرای ریز شمع و اتصال مناسب آن به شالوده می تواند به عنوان یکی از گزینه های بهسازی پی بررسی شود.

اجرای ریز شمع نباید به صورت مستقل و بدون بررسی مسیر انتقال بار انجام شود. تعداد، آرایش، طول، ظرفیت و جزئیات اتصال ریز شمع ها به شالوده باید بر اساس شرایط ژئوتکنیکی، بارهای ساختمان، ظرفیت پی موجود و طرح اجرایی تعیین شود.

هم زمان، در صورت تأیید کاهش ظرفیت یا سختی دیوارهای باربر، مقاومسازی موضعی یا گسترده اجزای سازه ای باید بر اساس ارزیابی سازه ای انجام شود. پس از تأمین شرایط مناسب در پی و سازه، ترمیم نهایی ترک ها و اجزای آسیب دیده ساختمان انجام خواهد شد.

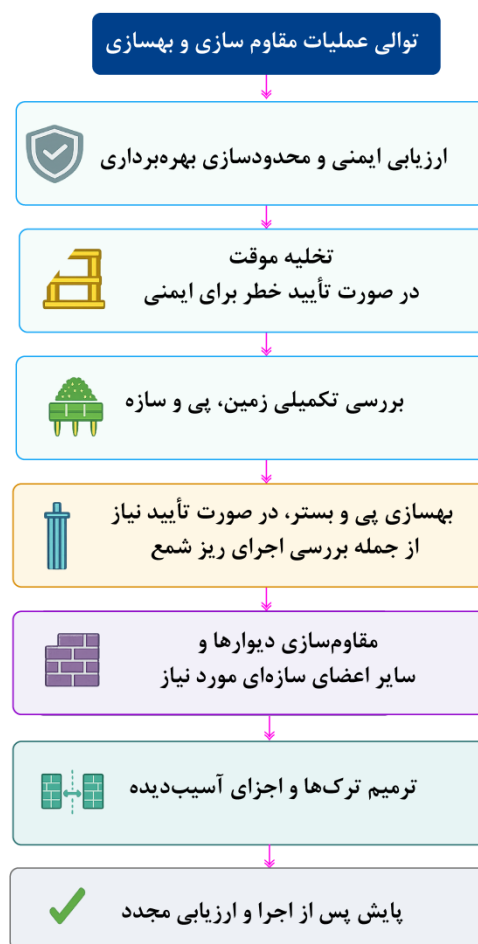
ب-۲-۹- پایش پس از اجرا

پس از اجرای اقدامات مقاومسازی، پایش ساختمان باید ادامه یابد. شاخص های مورد بررسی شامل پهنای ترک ها، نشست و نشست تفاضلی، کج شدگی، تغییر شکل دیوارها و وضعیت بهره برداری ساختمان خواهد بود.

کاهش یا توقف روند افزایش ترک ها، کاهش تغییر شکل های ثبت شده و پایدار شدن وضعیت ساختمان می تواند به عنوان بخشی از شواهد ارزیابی عملکرد اقدامات انجام شده مورد استفاده قرار گیرد. در صورت افزایش مجدد شاخص های آسیب یا ظهور علائم جدید، ارزیابی ساختمان و راهبرد مداخله باید بازنگری شود.

ب-۲-۱۰- توالی اجرای مداخله

با توجه به شدت آسیب، توالی کلی اقدامات در این مثال به صورت شکل (ب-۲) در نظر گرفته می‌شود. این ترتیب یک قاعده ثابت برای همه ساختمان‌ها نیست و باید بر اساس شرایط واقعی ساختمان، نتایج مطالعات و طرح اجرایی اصلاح شود. در مواردی که ناپایداری وجود دارد، پایدارسازی موقت باید پیش از عملیات دائمی انجام شود.



شکل ب-۲- توالی عملیات در مثال ب-۲

ب-۲-۱۱- جمع‌بندی نتیجه مثال

در این مثال، سوله صنعتی مورد بررسی بر اساس بیشترین پهنای ترک برابر با ۵۰ میلی‌متر و دوران نسبی حدود ۱/۵۰ در رده خرابی بسیار شدید قرار گرفت. وجود ترک‌های فعال در دیوارهای باربر، کج شدگی دیوار، خردشدگی موضعی مصالح و اختلال شدید در بهره‌برداری، اهمیت سازه‌ای آسیب و ضرورت اتخاذ اقدامات فوری را تأیید می‌کند. بنابراین، برخلاف مثال ساختمان با رده خرابی متوسط، در این حالت مداخله نباید مستقیماً با ترمیم ترک‌ها آغاز شود. ابتدا باید ایمنی ساختمان تأمین و در صورت وجود خطر برای بهره‌برداران، تخلیه موقت انجام شود. سپس پایدارسازی موقت و مهاربندی لازم اجرا و وضعیت زمین، پی و سازه به‌صورت تکمیلی بررسی شود.

در صورت تأیید ضعف یا ناکافی بودن عملکرد پی و بستر، بهسازی پی و بستر، از جمله بررسی امکان اجرای ریز شمع، باید در چارچوب یک طرح مهندسی انجام شود. پس از تأمین شرایط مناسب تکیه‌گاهی و اطمینان از مسیر انتقال بار، مقاومت‌سازی اعضای سازه‌ای و در نهایت ترمیم ترک‌ها و اجزای آسیب‌دیده ساختمان قابل بررسی خواهد بود. پایش پس از اجرا نیز برای ارزیابی روند تغییر شکل و عملکرد اقدامات انجام‌شده ادامه می‌یابد.

مراجع

ACI Committee 224 (2007), *ACI 224.1R-07: Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

ACI Committee 318 (2014), *ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

ACI Committee 228 (2023), *ACI PRC-228.4-23: Visual Condition Survey of Concrete—Guide*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

Audell, H.S. (2006), *Field Guide to Crack Patterns in Buildings*, Association of Environmental & Engineering Geologists (AEG), Denver, CO, USA.

Baum, R.L., Galloway, D.L. and Harp, E.L. (2008), *Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1164, U.S. Geological Survey, USA.

Bjerrum, L. (1963), “Discussion, Session IV”, *Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Wiesbaden, Germany, pp. 135-137.

Boone, S.J. (1996), “Ground-movement-related building damage”, *Journal of geotechnical engineering*, 122(11), pp. 886-896.

Boscardin, M.D. (1980), “Building response to excavation-induced ground movements”, Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

Boscardin, M.D. and Cording, E.J. (1989), “Building response to excavation-induced settlement”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), January, pp. 1-21.

BRE (1995), *Assessment of Damage in Low-Rise Buildings: With Particular Reference to Progressive Foundation Movement*, BRE Digest 251, Building Research Establishment, Watford, UK.

BRE (1999), *The Influence of Trees on House Foundations in Clay Soils*, BRE Digest 298, Building Research Establishment, Watford, UK.

Bureau of Indian Standards (1984), *Handbook on Causes and Prevention of Cracks in Building*, SP 25, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

Burland, J.B. (1997), “Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation”, *Earthquake Geotechnical Engineering: Proceedings of the First International Conference*, K. Ishihara (ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 1189-1201.

Burland, J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B. (1977), “Behaviour of foundations and structures”, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Tokyo, Japan, pp. 495-546.

Burland, J.B. and Wroth, C.P. (1975), "Settlement of buildings and associated damage", *Settlement of Structures: Proceedings of the Conference of the British Geotechnical Society*, Pentech Press, London, UK, pp. 611-654.

CECS 77:96 (1996), "Technical Code for Strengthening Steel Structures", China Construction Industry Press, Beijing, China.

CECS 146 (2003), "Technical Specification for Strengthening Concrete Structure with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate", China Planning Press, Beijing, China.

CECS 293:2011 (2011), "Technical Specification for Inspection and Treatment of Cracks in Buildings", China Construction Industry Press, Beijing, China.

Chang, H. and Xia, J. (2011), "Numerical study of the sluice chamber within mining subsidence areas", *Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, IEEE, Lushan, China, pp. 512-515.

Day, R.W. and Boone, S.J. (1998), "Discussion and closure: Ground-movement-related building damage", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), May, pp. 462-465.

DB4201/T 693-2024 (2024), "Technical Specification for Soft Soil Foundations of Buildings and Municipal Engineering in Wuhan, Hubei Province", China Construction Industry Press, Beijing, China.

DZ/T 0286-2015 (2015), "Specification of Risk Assessment for Geological Hazard", China Construction Industry Press, Beijing, China.

Dickinson, P., Dickinson, P.R. and Thornton, N. (2004), *Cracking and Building Movement*, illustrated ed., RICS Business Services, London, UK.

EUR 23289 EN (2008), *Seismic Retrofit of RC Frame Buildings with Masonry Infill Walls: Literature Review and Preliminary Case Study*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

FEMA 356 (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.

Freeman, T., Driscoll, R.M.C. and Littlejohn, G.S. (2001), *Has Your House Got Cracks?: A Homeowner's Guide to Subsidence and Heave Damage*, 2nd ed., Emerald Publishing Limited, London, UK.

Gambolati, G. and Teatini, P. (2021), *Land Subsidence and Its Mitigation*, The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.

GB 50003-2001 (2001), "Code for Design of Masonry Structures", China Construction Industry Press, Beijing, China.

- GB 50007-2011 (2011), “Code for Design of Building Foundation”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50010-2010 (2010), “Code for Design of Concrete Structures”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50011-2010 (2010), “Code for Seismic Design of Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50021-2001 (2009), “Code for Investigation of Geotechnical Engineering”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50068-2018 (2018), “Unified Standard for Reliability Design of Building Structures”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50292-2015 (2015), “Standard for Appraisal of Reliability of Civil Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB/T 50344-2019 (2019), “Technical Standard for Inspection of Building Structures”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 50367-2013 (2013), “Code for Design of Strengthening Concrete Structures”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 55003-2021 (2021), “General Code for Building and Municipal Foundations”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- GB 55021-2021 (2021), “General Code for Appraisal and Strengthening of Existing Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- Ghanbari, A., Nakhaee, M., Kalani, S. and Azizi, H. (2026), “A Field-Based Investigation of Land Subsidence Indicators in Alborz Province, Iran”, *Engineering Geology*, 20(1), p. e11043.
- Holland, M. (2012), *Practical Guide to Diagnosing Structural Movement in Buildings*, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Jiang, Z., Yang, J. and Su, H. (2023), “Mechanical response of masonry structure strengthened with ultra-high performance concrete (UHPC): A comparative analysis for different strengthening tactics”, *Frontiers in Materials*, 10, Article 1289225.
- JG/T 125-2017 (2017), “Building Hardware of Windows and Doors—Hinges”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- JGJ 79-2012 (2012), “Technical Code for Ground Treatment of Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.
- JGJ 116-2009 (2009), “Technical Specification for Seismic Strengthening of Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.

JGJ 123-2012 (2012), “Technical Code for Foundation Reinforcement of Existing Buildings”, China Construction Industry Press, Beijing, China.

JGJ/T 317-2014 (2014), “Technical Specification for Prevention and Treatment of Cracks in Building Engineering”, China Construction Industry Press, Beijing, China.

KDS 41 17 00:2019 (2019), “Seismic Design Code of Buildings”, Korean Design Standard, Seoul, Republic of Korea.

Lei, S.G., Deng, K.Z. and Wang, Y.X. (2014), “Research on ground fissure treatment filling with super-high-water material”, *Journal of China Coal Society*, 39(1), pp. 72-77.

Liu, X. and Xu, L. (2022), “Soil-building interaction under surface horizontal strain induced by underground mining”, *Advances in Civil Engineering*, 2022, Article ID 2425936, 12 pp.

Meyerhof, G.G. (1956), “Discussion on ‘The allowable settlements of buildings’ by A.W. Skempton and D.H. MacDonald”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part II, 5(6), pp. 774-775.

Mohammed, B.S., Abu Bakar, B.H. and Choong, K.K. (2009), “The effects of opening on the structural behavior of masonry wall subjected to compressive loading—strain variation”, *The Open Civil Engineering Journal*, 3, pp. 62-73.

Nguyen, H.P. and Nguyen, P.C. (2025), “The Impact of Different Bracing Ratios on the Structural Performance of Planar Steel Frames”, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3), pp. 22388-22393.

Polshin, D.E. and Tokar, R.A. (1957), “Maximum allowable non-uniform settlement of structures”, *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, Butterworth’s Scientific Publications, London, UK, pp. 402-405.

Schuster, M., Kung, G.T.C., Juang, C.H. and Hashash, Y.M.A. (2009), “Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), December, pp. 1823-1835.

Skempton, A.W. and MacDonald, D.H. (1956), “The allowable settlements of buildings”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), November, pp. 727-768.

Tahmoures, F. and Ghanbari, A. (2024), “New design charts for evaluating the damage potential to RC frame buildings adjacent to deep excavations”, *Engineering Computations*, 41(6), pp. 1529-1548.

Tandanand, S. and Powell, L.R. (1991), *Determining Horizontal Displacement and Strains Due to Subsidence*, Report of Investigations 9358, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Minneapolis, MN, USA.

The Institution of Structural Engineers (2000), *Subsidence of Low-Rise Buildings: A Guide for Professionals and Property Owners*, 2nd ed., SETO, London, UK.

Waltham, T., Bell, F.G. and Culshaw, M.G. (2007), *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, illustrated ed., Springer Science & Business Media, Berlin, Germany.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان البرز (۱۴۰۴)، گزارش ارزیابی ریسک فرونشست زمین در دشت‌های استان البرز، البرز، ایران.

مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (۱۴۰۱)، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، ویرایش پنجم، نشر توسعه ایران، تهران، ایران.

نشریه شماره ۳۶۰ (۱۳۹۲)، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، سازمان برنامه و بودجه کشور، تهران، ایران.

نشریه شماره ۵۲۴ (۱۳۸۹)، راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور، تهران، ایران.

راهنمای ارزیابی ریسک فرونشست زمین (۱۴۰۵)، پیش‌نویس در دست تهیه، سازمان برنامه و بودجه کشور، تهران، ایران.

قنبری، علی و محمودی مهریزی، محمد عماد (۱۳۹۸)، مبانی بهسازی خاک، انتشارات دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

فاخر، علی (۱۴۰۳)، مهندسی پی پیشرفته، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.

قنبری، علی و شعبانی، محمدجواد (۱۳۹۸)، اصول مهندسی گودبرداری، جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization**

Guideline for Strengthening and Retrofitting Buildings in Areas Affected by Land Subsidence

IR-No./IR-Code □□□□

Last Edition: 08-10-2026

A

angular distortion

دوران نسبی

نسبت اختلاف نشست میان دو نقطه از ساختمان یا پی که به فاصله افقی میانشان سنجیده می‌شود و شاخصی برای ارزیابی تغییر شکل و احتمال آسیب است.

aquifer

آبخوان

سازند یا مجموعه‌ای از سازندهای زمین‌شناختی اشباع و نفوذپذیر که قابلیت ذخیره‌سازی و انتقال مقدار قابل استفاده‌ای از آب زیرزمینی را دارند.

assessment of damage

ارزیابی آسیب

فرایند شناسایی، ثبت و بررسی نوع، محل، گستره و شدت آسیب‌های موجود در زمین، پی، اعضای سازه‌ای، اجزای غیر سازه‌ای و تأسیسات ساختمان.

Guideline for Strengthening and Retrofitting Buildings in Areas Affected by Land Subsidence [No...]

Authors & Contributors Committee:

Seyed Taha Tabatabaie Aghda	Road, Housing & Urban Development Research	Ph.D. of Civil Engineering, Soil and Foundation.
Ali Ghanbari	Kharazmi University	Ph.D. of Geotechnical Eng.
Fatemeh Tahmoures	Kharazmi University	M.Sc. of Geotechnical Eng.
Vahid Shirgir	Kharazmi University	Ph.D. of Geotechnical Eng.
Parham Tirzan	Road, Housing & Urban Development Research	M.Sc. of Geotechnical Eng.

این راهنما

با عنوان «راهنمای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در مناطق دارای فرونشست زمین» با هدف ارائه چارچوبی فنی برای شناسایی، ارزیابی، بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود واقع در پهنه‌های دارای فرونشست، در پنج فصل و دو پیوست تدوین شده است. مطالب این راهنما شامل کلیات و تعاریف، مبانی فرونشست زمین و آثار آن بر ساختمان‌ها، شناسایی و تحلیل آسیب‌ها، روش‌های مقاوم‌سازی و بهسازی زمین، پی، اعضای سازه‌ای و اجزای غیر سازه‌ای، الزامات اجرا و پایش، چک‌لیست‌های مرحله‌ای ارزیابی و یک مثال کاربردی برای تعیین سطح خرابی و انتخاب راهبرد مقاوم‌سازی است.