آژند

۲

فصلنامه علمی - تخصصی اتحادیه انجمن های
علمی عمران دانشگاه ملی مهارت
سال اول - شماره ۲ - زمستان ۱۴۰۴

فصلنامه علمی – تخصصی انجمن علمی عمران–آژند دانشگاه ملی مهارت واحد استان کرمان

شناسنامه :

صاحب امتیاز :
دانشکده شهید چمران کرمان

مدیر مسئول :
علیرضا تقی پور

سر دبیر :
امیر حسین آرمونتن

استاد مشاور انجمن علمی :
دکتر محمد مصطفی جعفری

زمینه انتشار :
علمی، تخصصی

ویراستار ادبی :
مهدی رستمی راوری

تاریخ / ترتیب انتشار :
۱۴۰۴/۱۲/۰۶ / فصلنامه

هیئت تحریریه :

مهدی رستمی راوری

علیرضا تقی پور

ابوالفضل باغگلی

امیر حسین آرمونتن

راه های ارتباطی :

@anjoman_azhand_omran

azhandscienceassociation@gmail.com

kerman.tvu.ac.ir

سخن مدیر مسئول

علیرضا تقی پور ؛ دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده شهید چمران کرمان

به نام پیوند دهنده اجزای آفرینش

هر مسیری که در علم آغاز می‌کنیم، گامی است به سوی دانش بیشتر و یافتن راه‌حل برای نیازهای مهندسی جامعه. ما، دانشجویان نسل امروز، می‌دانیم که انرژی و ایده‌های تازه چقدر می‌تواند این مسیر را روشن و پویا کند.

با انگیزه و پشتکار جمعی، فصلنامه علمی ـ تخصصی «آژند» را بنیان گذاشتیم؛ نشریه‌ای که نامش یادآور ساختار و بنیاد هر سازه است و هدفش به اشتراک گذاشتن دانش، پژوهش‌های نوین، و ایجاد فضایی برای تبادل تجربه میان دانشجویان و مهندسین جوان می‌باشد.

پس از ماه‌ها تلاش و همکاری مستمر، خوشحالیم که دومین شماره «آژند» را تقدیم جامعه علمی و مهندسی کشور می‌کنیم. امیدواریم این نشریه، بستری باشد برای رشد علمی، گفت‌وگو درباره پژوهش‌های نو، و ایجاد ارتباطی مستمر میان علاقه‌مندان به عمران و مهندسی.

با امید، به آینده‌ای روشن و پویا

سخن سردبیر

امیر حسین آرمونتن ؛ دانشجوی کارشناسی عمران دانشکده شهید چمران کرمان

به نام خداوند جان و خرد

خدا را شاکریم که توفیقی حاصل شد تا بتوانیم دومین فصلنامه نشریه آژند را با افتخار تقدیم علاقه‌مندان و فعالان حوزه مهندسی عمران نماییم. در این شماره از نشریه، تلاش کرده‌ایم تا مقالات و مطالبی پیرامون کاربردهای گسترده مهندسی عمران در توسعه زیرساخت‌ها و پیشرفت جوامع ارائه کنیم تا گامی هرچند کوچک در معرفی ابعاد وسیع این علم و بررسی جایگاه آن در جهان برداشته باشیم.

جا دارد از تمامی نویسندگان، پژوهشگران، مترجمان و همراهانی که در مسیر تهیه و تدوین این شماره ما را یاری کردند، صمیمانه سپاسگزاری نمایم. همچنین از جناب آقای مهدی رستمی راوری بابت همراهی‌ها و حمایت‌های ارزشمندشان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان، بر خود لازم می‌دانم از اساتید ارجمند، جناب آقای دکتر محمدمصطفی جعفری و سرکار خانم دکتر ملیحه ضیا، به دلیل حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و الطاف ارزشمندشان نسبت به این مجموعه، نهایت سپاس و قدردانی را ابراز نمایم.

فهرست

۱ **پروژه ها و سازه های شاخص**
- بررسی فرودگاه بین المللی کانسای

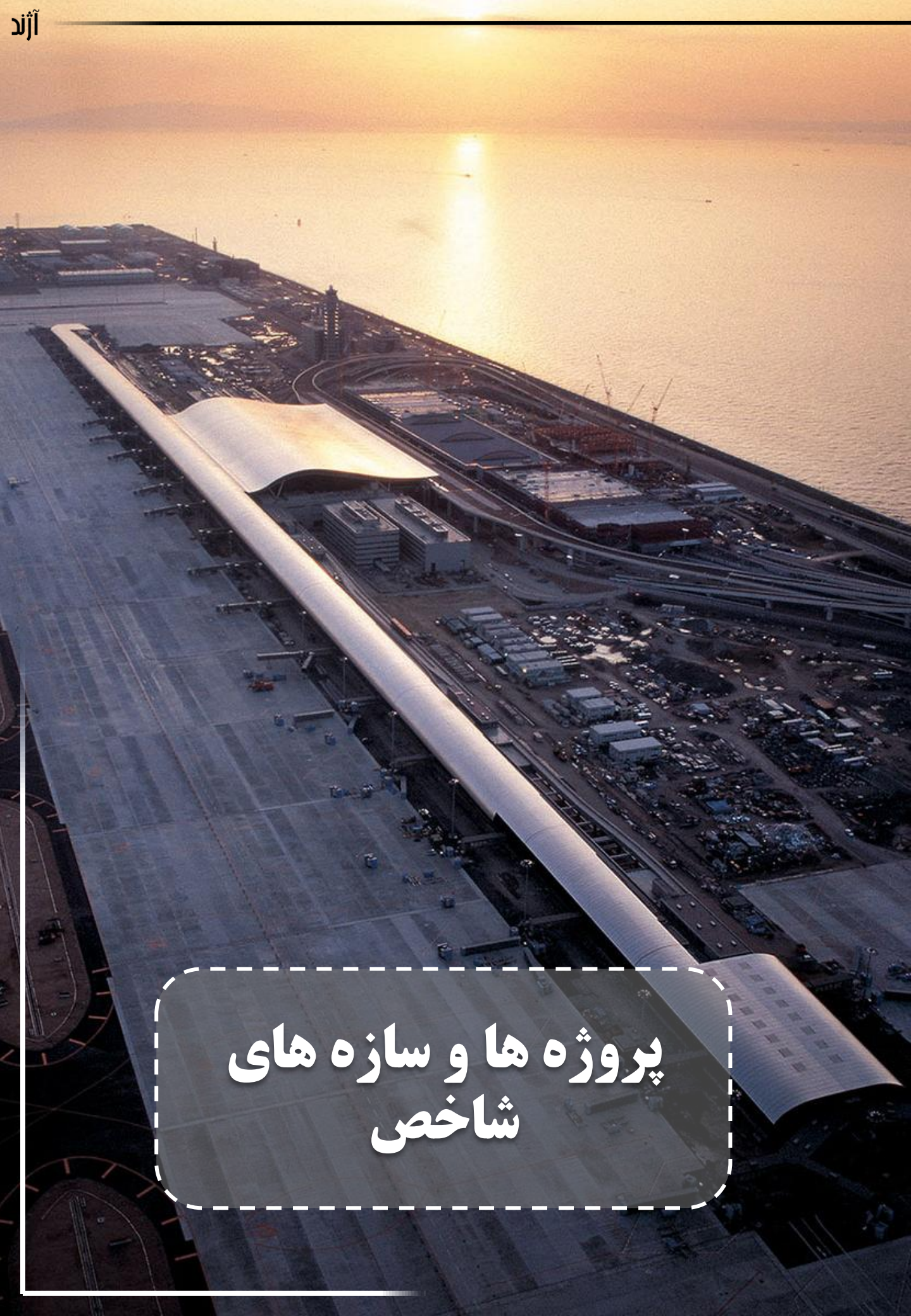
۸ **مهندسی اجرایی سازه**
- ارزیابی فنی اجرای والپست در ساختمان‌ها

۱۵ **ژئو تکنیک ، راه ، ترابری و زیرساخت**
- مقایسه روسازی انعطاف‌پذیر و صلب

۲۰ **مرمت ، تعمیر و نگهداری**
- مقاوم‌سازی تیرهای بتنی و فولادی با استفاده از ورق‌های الیاف مرکب پلیمری

۲۵ **فناوری های نوین عمران و محیط زیست**
- تحول طراحی و مهندسی در خانه‌های چاپ سه‌بعدی

۳۰ **معرفی کتاب ، نرم افزار**
- کتاب طراحی سازه‌های فولادی
- نرم‌افزار SAP2000



پروژه ها و سازه های شاخص

بررسی فرودگاه بین المللی کانسای[1]

نویسنده :
مهدی رستمی راوری
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

مقدمه

فرودگاه بین‌المللی کانسای در فاصله ۵ کیلومتری ساحل خلیج اوساکا و ۴۰ کیلومتری جنوب غربی اوساکا قرار دارد و نخستین فرودگاه جهان است که به‌طور کامل بر روی جزیره‌ای مصنوعی ساخته شده است. انگیزه اصلی ساخت آن، اشباع ظرفیت فرودگاه قدیمی ایتامی بود که به دلیل وجود کوه‌ها در یکسو و توسعه فشرده شهری در سوی دیگر، هیچ امکانی برای گسترش باند پرواز یا ترمینال نداشت.

علاوه بر محدودیت فضا، فرودگاه ایتامی در میان مناطق مسکونی پرجمعیت قرار گرفته بود و پروازهای شبانه به دلیل آلودگی صوتی شدیداً محدود شده بودند. مهندسان و برنامه‌ریزان شهری به این نتیجه رسیدند که تنها راه‌حل، ساخت یک فرودگاه کاملاً جدید در دریا و دور از مناطق مسکونی است؛ جایی که پرواز و فرود هواپیماها هیچ مزاحمتی برای ساکنان ایجاد نکند. این تصمیم اجازه داد فرودگاه کانسای، برخلاف بسیاری از فرودگاه‌های دیگر ژاپن، به‌صورت ۲۴ ساعته شبانه‌روزی فعالیت کند ویژگی‌ای که آن را به دروازه اصلی منطقه کانسای (شامل سه شهر اوساکا، کوبه و کیوتو) برای پروازهای بین‌قاره‌ای تبدیل کرد.

مشخصات کلی پروژه

- مکان: اوساکا، ژاپن
- آغاز سال ساخت: ۱۹۸۷
- افتتاح: ۴ سپتامبر ۱۹۹۴
- مساحت جزیره اول: ۵۱۱ هکتار (۵ کیلومتر مربع)
- مساحت جزیره دوم: ۵۴۵ هکتار (۵.۵ کیلومتر مربع)
- عمق آب در محل ساخت: ۱۸ الی ۲۰ متر
- طول ترمینال: ۱/۸ کیلومتر
- معمار: رنزو پیانو[2]
- مهندس سازه: گروه اوه آروپ[3]

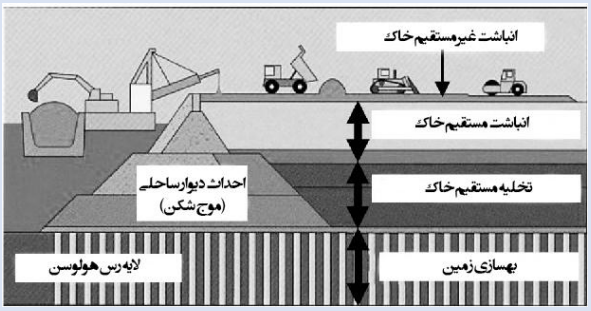
پایه جزیره

کف خلیج اوساکا از رس آبرفتی نرم تشکیل شده که مانند اسفنج آب‌دار عمل می‌کند؛ هر وزنی که روی آن قرار گیرد، آب درون رس را بیرون می‌راند و باعث فشردگی و نشست تدریجی زمین می‌شود. این فرآیند طبیعی که در مهندسی ژئوتکنیک «تحکیم» نامیده می‌شود، در رس می‌تواند، صدها سال طول بکشد، چون مولکول‌های آب باید مسیر افقی بسیار طولانی را در داخل لایه رسی طی کنند تا سرانجام به مرز لایه برسند و خارج شوند. اگر مهندسان منتظر این فرآیند طبیعی می‌ماندند، ساخت فرودگاه عملاً غیرممکن بود (شکل ۱-۱).

1 - International Osaka Airport (KIX)
2 - Renzo Piano
3 - Ove Arup construction group

(شکل ۱-۱)خاک ریزی جزیره اول

راه‌حل مهندسان، نصب ۲.۲ میلیون زهکش شنی عمودی در سراسر بستر دریا بود. روش اجرا به این صورت بود: یک لوله فلزی توخالی با ضربه به داخل کف دریا کوبیده می‌شد دقیقاً مانند فرو کردن یک سرنگ بزرگ در خاک. سپس همان لوله به آرامی بیرون کشیده می‌شد، در حالی که حفره باقی‌مانده با شن پر می‌گردید. شن به دلیل ساختار دانه‌ای خود، نسبت به رس تراکم‌یافته بسیار متخلخل‌تر است و آب به‌راحتی از میان آن عبور می‌کند. نتیجه این کار، ایجاد هزاران «کانال خروج» عمودی در سراسر بستر رسی بود. به‌جای اینکه آب رس مسیر افقی طولانی (گاه چند کیلومتر) را طی کند، اکنون کافی بود مسیر کوتاه عمودی حدود ۵۰ سانتی‌متر، چون فاصله بین زهکش‌های مجاور تقریباً یک متر بود را طی کند و وارد نزدیک‌ترین زهکش شنی شود؛ از آن‌جا آب به سمت سطح هدایت می‌شد. این تغییر ساده مسیر، زمان تحکیم را از مقیاس صدها سال به مقیاس چند سال کاهش داد و امکان ساخت در بازه زمانی معقول را فراهم کرد. پیش از آغاز عملیات پر کردن جزیره مصنوعی، یک دیوار دریایی محافظ در پیرامون محدوده احداث شد تا از پراکندگی مصالح و فرسایش ناشی از امواج جلوگیری شود. این دیوار از حدود ۴۸۰۰۰ بلوک بتنی چهارشاخه موسوم به «تتراپود[1]» تشکیل شده بود. شکل هندسی ویژه این بلوک‌ها باعث می‌شود هنگام چیدمان، فضاهای خالی متعددی میان آن‌ها ایجاد شود؛ این ویژگی انرژی امواج را مستهلک و پراکنده کرده و شدت برخورد آن‌ها با سازه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ۶۹ سلول فولادی عظیم در بخش‌های مختلف دیواره محیطی نصب شدند. این سلول‌ها که هر یک صدها تن وزن داشتند، در تأمین پایداری دیوار پیرامونی و محصورسازی مصالح پرکننده جزیره نقش اساسی ایفا کردند. (شکل ۱-۲)



(شکل ۱-۲) مراحل اجرای عملیات بهسازی زمین، احداث دیوار ساحلی و خاکریزی در اراضی ساحلی بر روی لایه رس هولوسن

نشست بیش از حد انتظار

برآورد اولیه مهندسان، نشست ۵۰ ساله جزیره را حدود ۶ متر پیش‌بینی می‌کرد. اما واقعیت میدانی نشان داد جزیره اول تا سال ۲۰۱۲ به‌طور میانگین حدود ۱۳ متر نشست کرده تقریباً دو برابر برآورد اولیه و جزیره دوم نیز حدود ۱۴/۲ متر نشست داشته است.

بررسی این اختلاف عمده، دو دلیل اصلی را روشن کرد. دلیل اول این بود که عمق واقعی لایه‌های رسی قابل فشرده‌شدن بسیار بیشتر از چیزی بود که آزمایش‌های ژئوتکنیکی اولیه نشان می‌دادند؛ بررسی‌های بعدی ثابت کرد لایه‌های رسی فشرده‌پذیر تا عمق ۳۵۰ متر زیر کف دریا ادامه دارند، در حالی که مدل‌های اولیه فقط چند ده متر سطحی را در نظر گرفته بودند. دلیل دوم، پدیده‌ای به نام خزش بلندمدت[2] بود: رس حتی پس از خروج کامل آب از درون خود، همچنان به‌آرامی و به مرور زمان فشرده‌تر می‌شود رفتاری شبیه به خمیری که زیر فشار ثابت، ذره‌ذره و به‌آرامی شکل خود را تغییر می‌دهد، حتی بدون آنکه فشار جدیدی به آن وارد شود.

برای جبران این نشست غیرمنتظره، در طول سالیان متمادی، دیوار دریایی و سطح باندها و تاکسی‌وی‌ها بارها با افزایش‌های تدریجی (حدود ۲۰ سانتی‌متر در هر مرحله) بالا برده شدند. نرخ نشست سالانه نیز روندی کاهشی داشته: از حدود ۵۰ سانتی‌متر در سال در زمان افتتاح (۱۹۹۴) به حدود ۷ سانتی‌متر در سال در ۲۰۰۸ رسیده است؛ این کاهش نشان می‌دهد بخش عمده تحکیم اولیه رس به پایان رسیده و آنچه باقی مانده، خزش ثانویه بسیار آرام‌تر است.

1 - Tetrapod
2 - Secondary Compression

ترمینال

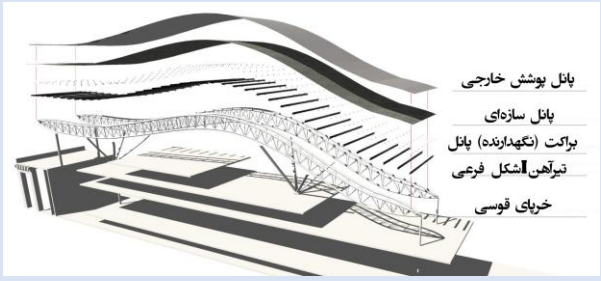
در سال ۱۹۸۸ یک مسابقه بین‌المللی معماری برای طراحی ترمینال برگزار شد که طرح معمار ایتالیایی رنزو پیانو، با همکاری مهندسان سازه گروه (اوه آروپ) به سرپرستی مهندس پیتر رایس، برنده آن شد. ویژگی متمایز این طرح، یکپارچگی کامل میان فرم معماری و عملکرد مهندسی بود؛ به این معنا که زیبایی بصری سقف کمانی صرفاً یک انتخاب تزئینی نبود، بلکه نتیجه مستقیم محاسبات آیرودینامیکی دقیق بود.

مهندسان یک مطالعه آیرودینامیکی کامل روی جریان هوای داخل ساختمان انجام دادند روشی مشابه آنچه برای طراحی بال هواپیما یا بدنه خودرو به کار می‌رود. نتیجه این مطالعات نشان داد که اگر مقطع عرضی سقف به‌صورت یک کمان نامنظم طراحی شود (یعنی ترکیبی از چند کمان با شعاع‌های متفاوت در طول مسیر، نه یک قوس یکنواخت)، می‌توان هوای ورودی از سمت سالن مسافران را به‌طور کاملاً طبیعی و بدون هیچ نیروی محرک مکانیکی اضافی به سمت باند پرواز در انتهای دیگر ساختمان هدایت کرد. این پدیده مشابه شکل بستر یک رودخانه است که صرفاً به واسطه هندسه خود، مسیر جریان آب را تعیین می‌کند بدون آنکه نیاز به پمپ یا فشار خارجی باشد.

برای هدایت دقیق‌تر و کنترل‌شده‌تر این جریان هوا، تیغه‌های فلزی شبیه به پره‌های یک پروانه بزرگ از سقف آویزان شدند که هوا را در مسیر مشخص نگه می‌دارند و در عین حال نور را نیز بازتاب می‌دهند. المانهای متحرک هنری اثر هنرمند شینگو که از سقف آویزانند، علاوه بر ارزش هنری، یک کارکرد مهندسی نیز دارند: حرکت دائمی این المان‌ها به بازدیدکنندگان و حتی به تیم نگهداری نشان می‌دهد جریان هوا در کدام مسیر و با چه شدتی در جریان است نوعی ابزار پایش بصری در قالب اثر هنری (شکل ۱-۳)

(شکل ۱-۳) نمای داخلی ترمینال

این سقف توسط تیرهای خرپایی سه‌بعدی با طول بیش از ۸۰ متر نگه داشته می‌شود؛ پروفیل نامتقارن این تیرها نیز بر اساس همان محاسبات آیرودینامیکی طراحی شده تا با شکل سقف هماهنگ باشد. سازه در مجموع بر روی بیش از یک میلیون ستون نگهدارنده قرار دارد که هر ستون ۲۰ متر در آب دریا، ۲۰ متر در لایه گلی (همان رس نرمی که پیش‌تر توضیح داده شد) و در نهایت ۴۰ متر در سنگ بستر مستحکم فرو رفته است به این ترتیب وزن کل سازه نه روی خاک نرم، بلکه نهایتاً روی پایه سنگی مستحکم منتقل می‌شود. (شکل ۱-۴)



(شکل ۱-۴) نحوه قرار گیری لایه ها و اجزای سقف ترمینال

جک‌های هیدرولیک [1]

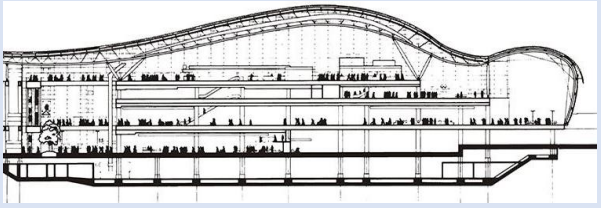
چالش دیگری که از همان مسئله نشست رس ناشی می‌شد این بود که نشست در طول ۱/۷ کیلومتر ساختمان به‌طور یکنواخت رخ نمی‌داد

1 - Hydraulic Jack

بخش‌های مختلف بستر دریا با نرخ‌های متفاوتی فشرده می‌شدند. اگر ساختمان مستقیماً و به‌صورت ثابت به زمین متصل بود، این اختلاف نشست بین دو سر ساختمان به مرور باعث کج‌شدگی، ترک‌خوردگی و در نهایت آسیب سازه‌ای می‌شد. راه‌حل مهندسان، جداسازی ساختمان از تماس مستقیم و ثابت با زمین بود. پایه‌های ترمینال روی ۹۰۰ جک هیدرولیک قرار گرفته‌اند.

جک‌هایی مشابه جک خودرو از نظر اصل عملکرد، اما به مراتب قوی‌تر، دائمی‌تر و دقیق‌تر، که قادرند وزن چندتنی هر بخش از ساختمان را تحمل کرده و ارتفاع آن را با دقت میلی‌متری تنظیم کنند. تیم مهندسی نگهداری به‌طور دوره‌ای (معمولاً سالانه) ارتفاع دقیق هر یک از این ۹۰۰ نقطه را اندازه‌گیری می‌کند. در صورتی که داده‌ها نشان دهد بخشی از ساختمان نسبت به بخش مجاور خود بیشتر نشست کرده، جک‌های همان ناحیه را به‌آرامی می‌چرخانند تا آن بخش از ساختمان دوباره به ارتفاع مرجع تراز شود.

این یک اقدام یک‌باره یا اضطراری نیست، بلکه یک برنامه نگهداری مستمر و بلندمدت است که از روز افتتاح فرودگاه در سال ۱۹۹۴ تا امروز همچنان ادامه دارد و انتظار می‌رود تا زمانی که نرخ نشست به‌طور کامل متوقف نشود، ادامه یابد. (شکل ۱-۵)



(شکل ۱-۵) مقطع ترمینال که از سقف تا جک های زیر آن را نمایش میدهد

مقاومت لرزه‌ای

ژاپن در منطقه‌ای واقع شده که صفحات تکتونیکی اقیانوسی و قاره‌ای به‌طور دائم با یکدیگر برخورد می‌کنند؛ از این رو هر سازه بزرگ در این کشور باید از همان مرحله طراحی، زلزله‌های شدید را به‌عنوان یک رویداد قطعی (نه یک ریسک نادر) در نظر بگیرد. منطق رایج در طراحی لرزه‌ای سنتی این است که سازه باید آن‌قدر سخت و صلب باشد که در برابر تکان زمین مقاومت کند؛ اما مشکل این رویکرد در ساختمانی به این بزرگی، تمرکز انرژی است: وقتی موج زلزله به یک سازه یک‌تکه و کاملاً صلب می‌رسد، انرژی لرزه‌ای در نقاط اتصال (محل تلاقی ستون‌ها، تیرها و دیوارها) متمرکز می‌شود و همان نقاط اتصال، اولین جایی هستند که می‌شکنند یا آسیب می‌بینند.

مهندسان فرودگاه کانسای رویکرد متفاوتی برگزیدند: به‌جای مقاومت صلب، اجازه دادن به حرکت کنترل‌شده. ساختمان به‌جای یک قطعه یکپارچه، از صدها قطعه مجزا تشکیل شده که به‌وسیله مفاصل لغزنده[1] به هم متصل‌اند این مفاصل در همه‌جای سازه حضور دارند: در محل اتصال سقف به دیوار، در میان بخش‌های مختلف کف‌پوش، در قاب‌بندی پنجره‌ها، و حتی در نرده‌های راه‌پله. هر یک از این قطعات می‌تواند چند سانتی‌متر مستقل از قطعه مجاور خود حرکت کند. نتیجه عملی این طراحی آن است که در هنگام زلزله، انرژی به‌جای تجمع در یک یا چند نقطه بحرانی، در قالب حرکت اصطکاکی کوچک در میان هزاران اتصال مجزا در سراسر سازه پخش و به‌تدریج مستهلک می‌شود.

کارایی این طراحی صرفاً نظری باقی نماند، بلکه در عمل و در شرایط واقعی به آزمون گذاشته شد. در ژانویه ۱۹۹۵، زلزله کوبه با بزرگی ۶/۹ ریشتر رخ داد؛ این زلزله که کانون آن تنها ۵ کیلومتر با فرودگاه فاصله داشت، بیش از ۱۵۰۰۰۰ ساختمان را در منطقه ویران یا به‌شدت آسیب‌دار کرد و بیش از ۶۳۰۰ کشته بر جای گذاشت. با وجود این، فرودگاه کانسای کاملاً بدون آسیب باقی ماند حتی یک پانل از شیشه‌های عظیم آتریوم آن نشکست. چند سال بعد، در طوفان سال ۱۹۹۸ که بادهایی با سرعت تا ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت به همراه داشت، فرودگاه نیز بدون آسیب جدی از این آزمون عبور کرد. این دو رویداد، اعتبار رویکرد «حرکت کنترل‌شده به‌جای مقاومت صلب» را به‌طور قطعی در عمل ثابت کردند.

1 - Sliding Joints

پل دسترسی و توسعه فاز دوم

از آن‌جا که فرودگاه در میانه دریا واقع شده، اتصال آن به سرزمین اصلی برای رفت‌وآمد مسافران و کارکنان، خود یک چالش مهندسی جداگانه بود.

این اتصال از طریق پل اسکای‌گیت به طول ۳/۷۵ کیلومتر برقرار می‌شود پلی که برای استفاده حداکثری از فضا، به‌صورت دو طبقه طراحی شده است: طبقه بالایی شامل یک جاده شش‌خطه دوطرفه برای تردد خودروها و اتوبوس‌ها، و طبقه پایینی شامل دو خط مستقل راه‌آهن است که مسافران را مستقیماً به ایستگاه مرکزی اوساکا متصل می‌کند. طراحی این پل باید دو نکته کلیدی را در نظر می‌گرفت: نخست، تحمل انبساط و انقباض حرارتی ناشی از نوسانات شدید آب‌وهوایی ژاپن در طول فصول مختلف سال، که با استفاده از درزهای انبساط مهندسی‌شده در نقاط مشخص از طول پل مدیریت شده است؛ دوم، توانایی تحمل بادهای شدید و احتمال زلزله، که با انتخاب مصالح و مقاطع سازه‌ای متناسب با استانداردهای لرزه‌ای ژاپن تأمین شده است. (شکل ۱-۶)

(شکل ۱-۶) پل اسکای گیت، متصل کننده جزایر فرودگاهی به شهر کانسای

با گذشت زمان و افزایش حجم ترافیک مسافری فراتر از ظرفیت طراحی‌شده جزیره اول، مدیران پروژه تصمیم به ساخت جزیره دوم گرفتند..

ساخت این جزیره با مساحت ۵۴۵ هکتار از سال ۱۹۹۹ آغاز شد و با استفاده از همان تجربیات و روش‌های ژئوتکنیکی به‌کاررفته در جزیره اول (شامل زهکش‌های شنی و دیوار دریایی تتراپودی) تکمیل گردید. باند پرواز دوم به طول ۴ کیلومتر در سال ۲۰۰۷ رسماً مورد بهره‌برداری قرار گرفت. این جزیره از طریق یک تاکسی‌وی به عرض ۳۰۰ متر به جزیره اول متصل است که به هواپیماها امکان می‌دهد بدون نیاز به پرواز مجدد، میان دو باند حرکت کنند.

نوآوری و دلیل آن	حوزه
زهکش‌های شنی عمودی: کوتاه کردن مسیر خروج آب از رس، از مقیاس صدها سال به چند سال	ژئوتکنیک
۹۰۰ جک هیدرولیک زیر پایه‌ها: امکان تراز کردن دوره‌ای ساختمان در برابر نشست نامتقارن	سازه/نشست
مفاصل لغزنده در سراسر سازه و گسکت لاستیکی شیشه‌ها: پخش انرژی لرزه به‌جای تمرکز آن	ضدزلزله
فرم کمانی سقف بر پایه محاسبات آیرودینامیک: هدایت طبیعی هوا بدون کانال‌های مکانیکی پنهان	تهویه

(جدول ۱-۱) خلاصه نوآوری های ساخت فرودگاه بین المللی کانسای

نتیجه‌گیری

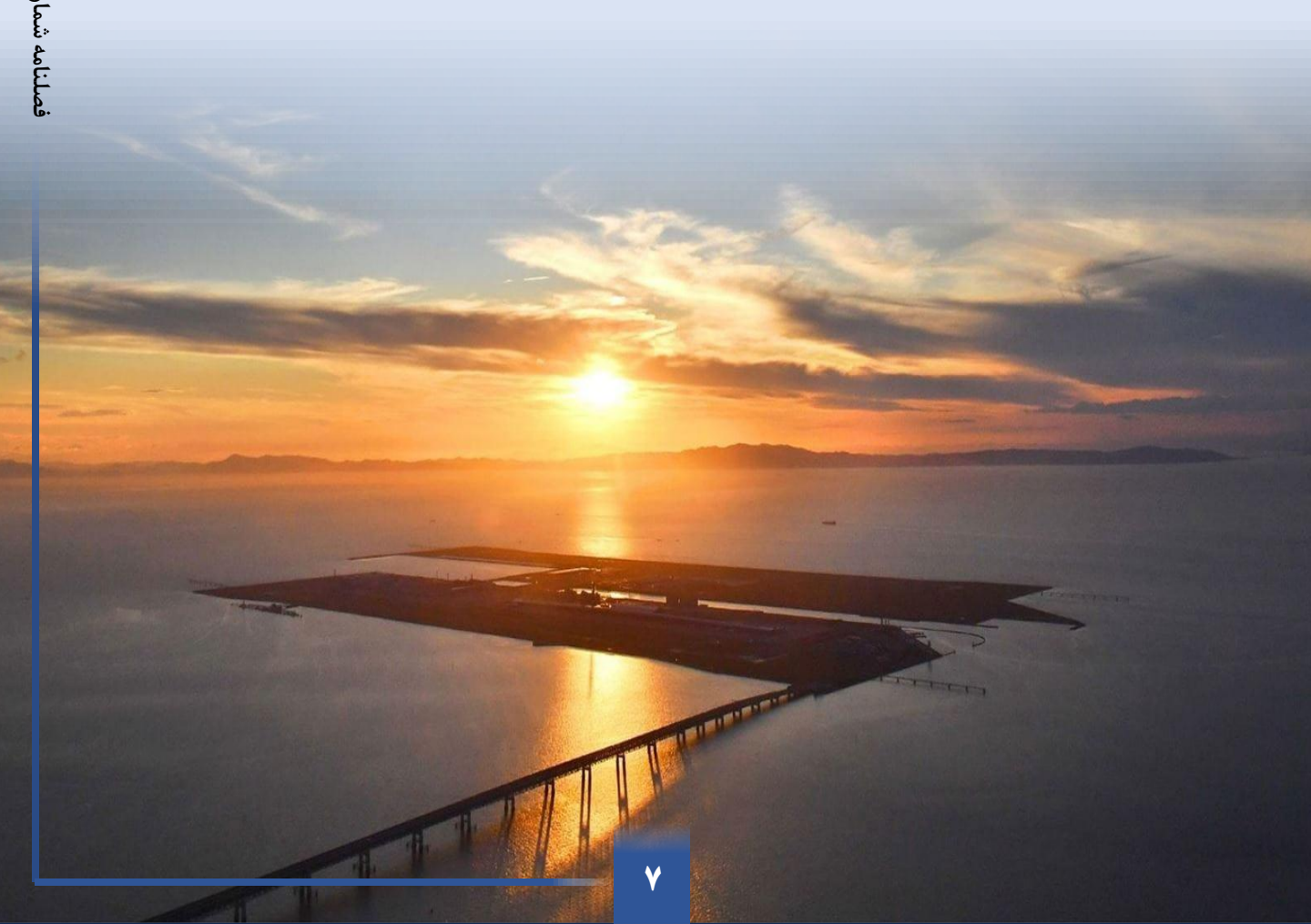
فرودگاه بین‌المللی کانسای نمونه‌ای آموزشی از حل هم‌زمان چندین چالش مهندسی بزرگ و به‌ظاهر متناقض است: تثبیت یک بستر دریایی نرم و غیرقابل‌اعتماد با ابزاری به‌سادگی زهکش‌های شنی؛ طراحی سازه‌ای انعطاف‌پذیر و قابل تنظیم در برابر نشست نامتقارن و غیرقابل‌پیش‌بینی، با استفاده از شبکه‌ای از جک‌های هیدرولیک؛ مقاومت در برابر یکی از فعال‌ترین مناطق لرزه‌ای جهان، نه از طریق سختی بیشتر بلکه از طریق پذیرفتن و هدایت حرکت؛ و در نهایت، تبدیل یک محدودیت عملکردی (نیاز به تهویه طبیعی) به یک ویژگی معماری برجسته و زیبایی‌شناختی، از طریق فرم آیرودینامیک سقف.

شاید مهم‌ترین درس این پروژه برای دانشجویان و مهندسان عمران، تفاوت میان «پیش‌بینی دقیق» و «طراحی قابل‌انطباق» باشد. با وجود اینکه پیش‌بینی‌های اولیه نشست زمین تا حدی نادرست از آب درآمدند، خودِ طراحی سازه به‌واسطه جک‌های هیدرولیک و دیوارهای دریایی قابل ارتفاع‌دهی به‌گونه‌ای انعطاف‌پذیر بود که امکان اصلاح و سازگاری مستمر را در طول دهه‌ها فراهم کرد. این اصل، فراتر از یک فرودگاه خاص، اصلی راهبردی برای طراحی هر سازه بزرگ‌مقیاس در شرایط ژئوتکنیکی نامطمئن است.

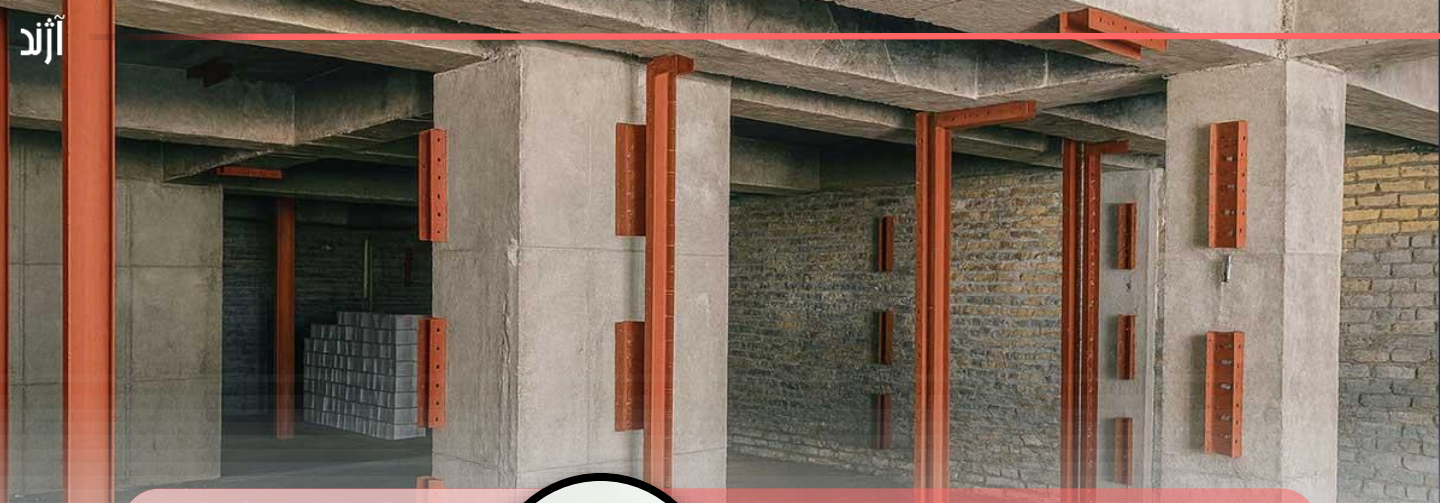
به دلیل همین ترکیب از خلاقیت معماری و دقت مهندسی عمران، انجمن مهندسی عمران آمریکا[1] در سال ۲۰۰۱ فرودگاه کانسای را به‌عنوان یکی از ده «بنای یادبود مهندسی عمران هزاره[2]» معرفی کرد جایگاهی که این پروژه را در کنار دیگر شاهکارهای بزرگ مهندسی عمران تاریخ معاصر قرار می‌دهد.

1 - ASCE

2 - Civil Engineering Monuments of the Millennium



مهندسی اجرایی سازه



ارزیابی فنی اجرای والپست[1] در ساختمان‌ها

نویسنده :

علیرضا تقی پور
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

مقدمه

در سال‌های اخیر، عملکرد نامناسب اجزای غیرسازه‌ای به‌ویژه دیوارهای پیرامونی و داخلی، به یکی از عوامل اصلی خسارات ناشی از زلزله در ساختمان‌ها تبدیل شده است. بررسی آسیب‌های زلزله‌های اخیر ایران نشان می‌دهد که تخریب خارج از صفحه دیوارها، جداشدگی از قاب سازه‌ای و سقوط اجزای دیوار، حتی در ساختمان‌های دارای اسکلت مقاوم، می‌تواند خسارات مالی و جانی قابل توجهی ایجاد کند. از این‌رو، مهار مناسب دیوارها و اجرای صحیح والپست به عنوان بخشی از سیستم ایمنی لرزه‌ای ساختمان، اهمیت ویژه‌ای یافته است.با تدوین ضوابط جدید در پیوست ششم استاندارد ۲۸۰۰ ایران، رویکرد طراحی و اجرای دیوارهای غیرسازه‌ای از روش‌های سنتی فاصله گرفته و بر کنترل تغییرشکل نسبی سازه، جلوگیری از انتقال نیروهای نامطلوب و تأمین پایداری خارج از صفحه دیوارها تأکید شده است. با وجود این، تجربه پروژه‌های ساختمانی نشان می‌دهد که هنوز چالش‌های متعددی در تفسیر ضوابط، انتخاب جزئیات اجرایی مناسب و کیفیت اجرای کارگاهی وجود دارد. هدف این مقاله، ارزیابی فنی اجرای والپست در ساختمان‌ها با تمرکز بر الزامات آیین‌نامه‌ای، روش‌های صحیح مهار دیوار و بررسی مهم‌ترین چالش‌ها و خطاهای اجرایی در کارگاه‌های ساختمانی است.

فلسفه فنی استفاده از والپست و رفتار لرزه‌ای دیوارها

دیوارهای پیرامونی و جداکننده داخلی اگرچه جزو اعضای باربر اصلی ساختمان محسوب نمی‌شوند، اما در هنگام وقوع زلزله تحت تأثیر مستقیم تغییرشکل‌های سازه قرار می‌گیرند. در ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی یا فولادی، قاب سازه‌ای در اثر نیروهای جانبی دچار تغییرمکان نسبی شده و این تغییرشکل به دیوارهای مجاور منتقل می‌شود. در صورتی که دیوارها به‌درستی مهار نشده باشند، تنش‌های ایجادشده می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی، جداشدگی از قاب یا حتی ریزش کامل دیوار شود.

یکی از مهم‌ترین آسیب‌پذیری‌های دیوارهای غیرسازه‌ای، رفتار خارج از صفحه آن‌ها است. در این حالت، نیروی جانبی ناشی از زلزله عمود بر سطح دیوار وارد شده و دیوار تمایل به خم شدن یا واژگونی پیدا می‌کند. از آنجا که مصالح بنایی در برابر نیروهای کششی و خمش دارای مقاومت محدودی هستند، دیوارهای بلند و بدون مهار کافی بیشترین احتمال آسیب‌دیدگی را خواهند داشت.

در گذشته، تصور غالب بر این بود که اتصال صلب دیوار به ستون‌ها و تیرهای سازه‌ای می‌تواند پایداری آن را افزایش دهد. با این حال، مطالعات آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی پس از زلزله نشان داد که این رویکرد در بسیاری از موارد موجب انتقال مستقیم نیروها و تغییرشکل‌های قاب به دیوار شده و احتمال ترک‌خوردگی و تخریب را افزایش می‌دهد. به همین دلیل، در ضوابط جدید مهار دیوارها، اصل «جداسازی عملکردی دیوار از سازه» مورد توجه قرار گرفته است.

فلسفه اصلی اجرای والپست، ایجاد یک سیستم مهارکننده برای کنترل رفتار خارج از صفحه دیوار و انتقال ایمن نیروهای جانبی به سازه است، بدون آنکه دیوار در برابر تغییرشکل‌های نسبی قاب مقید شود. در واقع، والپست باید به گونه‌ای عمل کند که ضمن حفظ پایداری دیوار،

1 - Wall-Post

امکان حرکت نسبی محدود میان دیوار و سازه را نیز فراهم نماید. این رویکرد موجب کاهش تمرکز تنش در دیوار و افزایش عملکرد لرزه‌ای آن می‌شود.

در ضوابط جدید، والپست صرفاً به عنوان یک عضو فلزی قائم یا افقی در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه بخشی از یک سیستم مهار لرزه‌ای شامل وادارها، اتصالات لغزشی، میلگرد بستر و جزئیات مناسب اتصال است. عملکرد مطلوب این سیستم زمانی حاصل می‌شود که تمامی اجزا به صورت هماهنگ عمل کرده و از ایجاد قیود ناخواسته جلوگیری شود.

یکی دیگر از اهداف اجرای والپست، کاهش طول آزاد دیوار است. با افزایش طول یا ارتفاع دیوار، احتمال کمانش، خمش خارج از صفحه و ایجاد ترک‌های گسترده افزایش می‌یابد. استفاده از وادارهای قائم و افقی موجب تقسیم دیوار به دهانه‌های کوچک‌تر شده و سختی و پایداری آن را بهبود می‌بخشد. این موضوع به‌ویژه در دیوارهای پیرامونی با طول زیاد یا دیوارهای دارای بازشو از اهمیت بیشتری برخوردار است.

بررسی خسارات زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها ناشی از عدم مهار مناسب دیوارهای غیرسازه‌ای بوده است.(شکل ۲-۱) سقوط دیوارها علاوه بر خسارات مستقیم، می‌تواند مسیرهای خروج اضطراری را مسدود کرده و خطرات ثانویه برای ساکنان و نیروهای امدادی ایجاد کند. از این رو، اجرای صحیح والپست را باید بخشی از راهبرد افزایش تاب‌آوری ساختمان و حفاظت از جان بهره‌برداران دانست، نه صرفاً یک الزام آیین‌نامه‌ای.

(شکل ۲-۱) عدم مهار دیوار ها و تخریب کامل آنها در زلزله

بر این اساس، رویکرد نوین مهار دیوارها بر سه اصل اساسی استوار است: تأمین پایداری خارج از صفحه، جلوگیری از انتقال نامطلوب نیروهای سازه‌ای به دیوار و امکان‌پذیر ساختن تغییرمکان نسبی کنترل‌شده میان دیوار و قاب. رعایت این اصول، مبنای طراحی و اجرای جزئیات ارائه‌شده در ضوابط فنی و آیین‌نامه‌های جاری کشور را تشکیل می‌دهد.

الزامات آیین‌نامه‌ای و مقررات حاکم بر اجرای والپست

تجربیات حاصل از زلزله‌های گذشته نشان داد که بخش قابل توجهی از خسارات ساختمان‌ها ناشی از عملکرد نامناسب اجزای غیرسازه‌ای است. به همین دلیل، در سال‌های اخیر ضوابط طراحی و اجرای دیوارهای غیرسازه‌ای در مقررات ملی و استانداردهای لرزه‌ای کشور مورد بازنگری قرار گرفته است. مهم‌ترین مرجع فنی در این زمینه، پیوست ششم استاندارد ۲۸۰۰ ایران است که با هدف افزایش ایمنی لرزه‌ای دیوارهای پیرامونی و جداکننده تدوین شده است. رویکرد حاکم بر این ضوابط بر این اصل استوار است که دیوارهای غیرسازه‌ای نباید به گونه‌ای اجرا شوند که تغییرشکل‌های سازه مستقیماً به آن‌ها منتقل شود. در واقع، دیوار باید ضمن برخورداری از پایداری کافی در برابر نیروهای جانبی، امکان جابه‌جایی نسبی کنترل‌شده نسبت به قاب سازه‌ای را نیز داشته باشد. این رویکرد تفاوت اساسی با بسیاری از روش‌های سنتی اجرای والپست دارد که در آن‌ها دیوار به‌صورت صلب به تیرها و ستون‌ها متصل می‌شد.

الزامات مهار خارج از صفحه دیوار: یکی از مهم‌ترین اهداف ضوابط جدید، کنترل رفتار خارج از صفحه دیوار است. دیوارهای بنایی به دلیل مقاومت محدود در برابر خمش، در صورت عدم مهار مناسب مستعد واژگونی یا ریزش تحت اثر نیروهای جانبی هستند. از این رو، آیین‌نامه استفاده از اجزای مهارکننده نظیر وادارهای قائم و افقی را برای محدود کردن ابعاد آزاد دیوار الزامی می‌داند. در این سیستم، وادارها به عنوان اعضای واسط عمل کرده و نیروهای وارد بر دیوار را به سازه اصلی منتقل می‌کنند. انتخاب محل و تعداد وادارها باید به گونه‌ای انجام شود که طول و ارتفاع آزاد دیوار از حدود مجاز تعیین‌شده در ضوابط فراتر نرود.

الزامات مربوط به جداسازی دیوار از قاب سازه‌ای: یکی از مهم ترین ضوابط، تأکید بر جداسازی عملکردی دیوار از سازه است. در گذشته، اتصال مستقیم دیوار به ستون یا تیر به عنوان یک روش رایج اجرایی شناخته می‌شد، اما مطالعات لرزه‌ای نشان داد که این نوع اتصال

موجب انتقال نیروها و تغییرمکان‌های قاب به دیوار شده و احتمال ترک‌خوردگی و تخریب را افزایش می‌دهد.بر همین اساس، در اجرای دیوارهای غیرسازه‌ای باید تمهیداتی برای تأمین حرکت نسبی میان دیوار و سازه در نظر گرفته شود. استفاده از اتصالات لغزشی، اجرای درزهای مناسب و پرهیز از ایجاد قیدهای ناخواسته از جمله راهکارهای مورد تأکید در ضوابط فنی است.

نقش میلگرد بستر در سیستم مهار دیوار: میلگرد بستر یکی از اجزای مکمل در سیستم مهار دیوارهای غیرسازه‌ای محسوب می‌شود. وظیفه اصلی این عضو، افزایش یکپارچگی دیوار و توزیع تنش‌های ایجادشده در بدنه آن است. با این حال، میلگرد بستر به تنهایی جایگزین والپست یا وادارهای قائم و افقی نیست و نمی‌تواند وظیفه مهار خارج از صفحه دیوار را بر عهده بگیرد.یکی از برداشت‌های نادرست رایج در برخی پروژه‌ها، حذف والپست به دلیل استفاده از میلگرد بستر است. این در حالی است که ضوابط موجود، این دو سیستم را دارای عملکردهای متفاوت و مکمل یکدیگر می‌دانند.

الزامات مربوط به اتصالات و جزئیات اجرایی: عملکرد مناسب والپست تا حد زیادی به کیفیت اجرای اتصالات وابسته است. حتی در صورت انتخاب صحیح نوع مهار، اجرای نامناسب اتصالات می‌تواند کل سیستم را با کاهش کارایی مواجه کند. از این رو، ضوابط فنی بر طراحی و اجرای صحیح محل اتصال وادارها به تیرها، ستون‌ها و سایر اجزای سازه‌ای تأکید ویژه‌ای دارند.در اجرای اتصالات باید از ایجاد محدودیت‌های غیرضروری برای حرکت دیوار جلوگیری شود. همچنین کیفیت جوشکاری، دقت نصب قطعات فلزی و رعایت ابعاد اجرایی(شکل ۲-۲) تعیین‌شده در نقشه‌ها از عوامل مؤثر در عملکرد لرزه‌ای سیستم محسوب می‌شوند.

(شکل ۲-۲) نصب و اتصال اعضای والپست

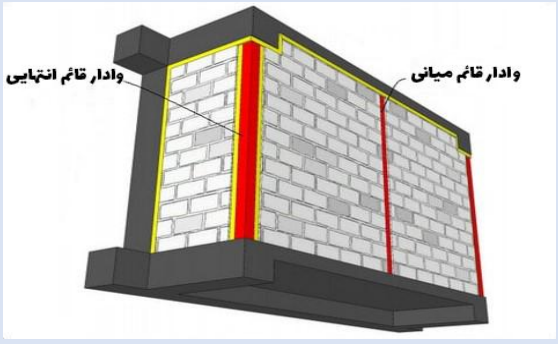
الزامات نظارت و کنترل کیفیت: مطالعات میدانی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مشکلات موجود در اجرای والپست، ناشی از ضعف نظارت یا تفسیر نادرست جزئیات اجرایی است. به همین دلیل، کنترل انطباق عملیات اجرایی با نقشه‌های مصوب و الزامات آیین‌نامه‌ای باید در تمامی مراحل اجرا مورد توجه قرار گیرد. بازرسی محل استقرار وادارها، کنترل نوع اتصالات، بررسی نحوه اجرای میلگرد بستر و اطمینان از وجود درزهای لازم از جمله مواردی است که باید در فرآیند نظارت مورد ارزیابی قرار گیرد. در واقع، تحقق اهداف لرزه‌ای پیش‌بینی‌شده در آیین‌نامه تنها زمانی امکان‌پذیر است که طراحی صحیح با اجرای دقیق و نظارت مؤثر همراه شود. در مجموع، ضوابط جدید مهار دیوارهای غیرسازه‌ای بر سه اصل اساسی استوار هستند: ۱- تأمین پایداری خارج از صفحه ۲- جلوگیری از انتقال نامطلوب تغییرشکل‌های سازه به دیوار ۳- حفظ یکپارچگی دیوار در هنگام زلزله. اجرای صحیح والپست زمانی موفق خواهد بود که تمامی جزئیات اجرایی در راستای تحقق این سه هدف طراحی و اجرا شوند.

روش‌های متداول اجرای والپست و مهار دیوارهای غیرسازه‌ای

تحولات آیین‌نامه‌ای سال‌های اخیر موجب تغییر قابل توجه در رویکرد مهندسان نسبت به مهار دیوارهای غیرسازه‌ای شده است. در گذشته، هدف اصلی از اجرای والپست افزایش سختی و پایداری دیوار تلقی می‌شد، در حالی که در ضوابط جدید، کنترل رفتار لرزه‌ای دیوار و جلوگیری از انتقال نامطلوب نیروهای ناشی از تغییرشکل سازه در اولویت قرار گرفته است. به همین دلیل، بسیاری از جزئیات اجرایی متداول در گذشته نیازمند بازنگری هستند.

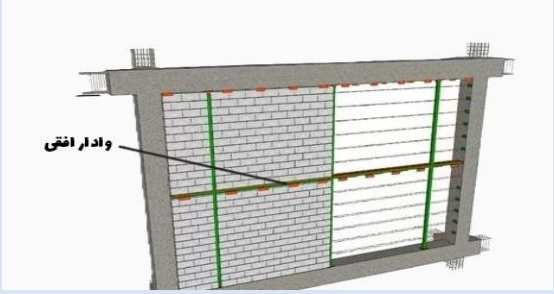
روش سنتی اجرای والپست: در روش سنتی، از پروفیل‌های فولادی نظیر ناودانی، نبشی یا قوطی برای ایجاد اعضای قائم و افقی در امتداد دیوار استفاده می‌شد. این اعضا معمولاً از طریق جوشکاری مستقیم به تیرها و ستون‌های سازه متصل شده و دیوار در میان آن‌ها اجرا می‌شد. اگرچه این روش تا حدی موجب افزایش مقاومت دیوار در برابر نیروهای خارج از صفحه می‌شد، اما در بسیاری از موارد به دلیل ایجاد اتصال صلب میان دیوار و قاب سازه‌ای، امکان انتقال مستقیم تغییرمکان‌های نسبی سازه به دیوار را فراهم می‌کرد. این مسئله یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد ترک‌های گسترده و آسیب‌دیدگی دیوارها در زلزله‌های گذشته بوده است.

استفاده از وادارهای قائم: وادار قائم یکی از رایج‌ترین اجزای مورد استفاده در ضوابط جدید مهار دیوار است. وظیفه اصلی این عضو، کاهش طول آزاد دیوار و کنترل تغییرشکل خارج از صفحه آن است. وادارها معمولاً در دیوارهای با طول زیاد، در مجاورت بازشوها یا در محل‌هایی که احتمال افزایش تغییرشکل وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. نکته مهم در اجرای وادار قائم‌آن است که اتصال آن به سازه باید به گونه‌ای طراحی شود که ضمن تأمین پایداری دیوار، از ایجاد قیدهای اضافی و انتقال نیروهای ناخواسته جلوگیری کند. (شکل ۲-۳) در بسیاری از جزئیات اجرایی جدید، استفاده از اتصالاتی که امکان حرکت نسبی کنترل‌شده را فراهم می‌کنند، توصیه می‌شود.



(شکل ۲-۳) شماتیک از وادار های قائم

استفاده از وادارهای افقی: در دیوارهایی که ارتفاع قابل توجهی دارند یا در شرایط خاص معماری قرار گرفته‌اند، استفاده از وادارهای افقی به منظور کاهش ارتفاع آزاد دیوار ضروری است. این اعضا با تقسیم دیوار به بخش‌های کوچک‌تر، موجب کاهش لنگرهای ناشی از بارهای جانبی و بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار می‌شوند.(شکل ۲-۴) جانمایی وادارهای افقی باید بر اساس ضوابط فنی و با توجه به ابعاد دیوار انجام شود. اجرای سلیقه‌ای یا حذف این اعضا می‌تواند موجب کاهش قابل توجه کارایی سیستم مهار شود.



(شکل ۲-۴) شماتیکی از وادار افقی

نقش میلگرد بستر در مهار دیوار: میلگرد بستر یکی از اجزای مکمل سیستم مهار دیوارهای غیرسازه‌ای است که به منظور افزایش انسجام دیوار و کنترل گسترش ترک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عضو با توزیع مناسب تنش‌ها در طول دیوار، مقاومت آن را در برابر بارهای جانبی افزایش می‌دهد.(شکل ۲-۵) با وجود مزایای میلگرد بستر، باید توجه داشت که عملکرد آن با والپست یا وادار متفاوت است. میلگرد بستر نمی‌تواند جایگزین اعضای مهارکننده خارج از صفحه شود و حذف وادارها به بهانه استفاده از میلگرد بستر، با الزامات فنی موجود همخوانی ندارد.

(شکل ۲-۵) شماتیکی از نحوه اجرا میلگرد بستر

سیستم‌های نوین مهار دیوار: در سال‌های اخیر، استفاده از جزئیات اجرایی مبتنی بر اتصالات لغزشی و مهارهای انعطاف‌پذیر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این سیستم‌ها، ایجاد تعادل میان پایداری دیوار و امکان تغییرمکان نسبی سازه است. در این روش‌ها، دیوار ضمن برخورداری از مهار مناسب در برابر نیروهای خارج از صفحه، در برابر تغییرشکل قاب سازه‌ای رفتار انعطاف‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. مزیت اصلی این رویکرد، کاهش احتمال تمرکز تنش در دیوار و افزایش دوام عملکرد آن در زلزله‌های متوسط و شدید است. به همین دلیل، بسیاری از جزئیات ارائه‌شده در ضوابط جدید بر استفاده از این مفهوم استوار هستند.در مجموع، انتخاب روش مناسب مهار دیوار باید بر اساس نوع سازه، ابعاد دیوار، شرایط معماری و الزامات آیین‌نامه‌ای انجام شود. آنچه امروزه اهمیت دارد، صرفا استفاده از والپست نیست، بلکه اجرای سیستمی است که بتواند الزامات عملکردی مورد انتظار در برابر بارهای لرزه‌ای را تأمین کند.

چالش‌ها و خطاهای اجرایی در کارگاه‌های ساختمانی

با وجود تدوین ضوابط نسبتاً دقیق در زمینه مهار دیوارهای غیرسازه‌ای، بررسی پروژه‌های ساختمانی نشان می‌دهد که فاصله قابل توجهی میان الزامات آیین‌نامه‌ای و کیفیت اجرای واقعی در کارگاه‌ها وجود دارد. این فاصله نه ناشی از نقص کامل مقررات، بلکه عمدتاً نتیجه ترکیبی از ضعف آموزش، تفسیر نادرست نقشه‌ها، محدودیت‌های اجرایی و نبود نظام کنترل کیفیت مؤثر است.

اتصال صلب دیوار به قاب سازه‌ای: یکی از رایج‌ترین خطاهای اجرایی، اجرای اتصال صلب میان دیوار و عناصر سازه‌ای نظیر تیر و ستون است. در بسیاری از پروژه‌ها، دیوار بنایی به‌صورت مستقیم و بدون در نظر گرفتن جزئیات لغزشی به قاب متصل می‌شود. این در حالی است که ضوابط جدید بر امکان حرکت نسبی کنترل‌شده تأکید دارند.

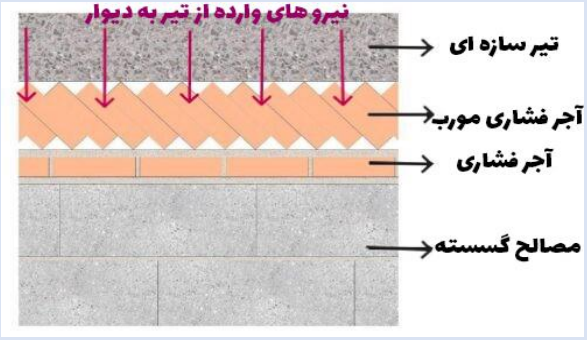
پیامد این خطا شامل موارد زیر است:

انتقال مستقیم تغییرمکان قاب به دیوار(شکل ۲-۶)

ایجاد ترک‌های مورب و افقی در دیوار

افزایش احتمال شکست خارج از صفحه

کاهش شدید شکل‌پذیری دیوار



(شکل ۲-۶) انتقال مستقیم تغییرمکان قاب به دیوار

حذف یا کاهش نقش وادارها: در برخی پروژه‌ها به دلیل کاهش هزینه یا برداشت نادرست از عملکرد سیستم، وادارهای قائم و افقی حذف یا به‌صورت ناقص اجرا می‌شوند. این موضوع موجب افزایش طول آزاد دیوار و در نتیجه کاهش مقاومت آن در برابر نیروهای جانبی می‌شود.

حذف وادارها معمولاً منجر به:

افزایش لاغری دیوار

تشدید رفتار کمانشی خارج از صفحه

تمرکز تنش در نواحی میانی دیوار می‌شود.

اجرای نادرست میلگرد بستر: میلگرد بستر به عنوان یکی از اجزای مهم در افزایش یکپارچگی دیوار، در بسیاری از پروژه‌ها یا به‌درستی اجرا نمی‌شود یا جایگاه آن با والپست اشتباه گرفته می‌شود. در برخی موارد، فاصله‌گذاری نامناسب یا قطع پیوستگی آن باعث کاهش کارایی سیستم می‌شود.نکته مهم این است که میلگرد بستر صرفاً نقش توزیع تنش و کنترل ترک را دارد و جایگزین مهار خارج از صفحه نیست.

عدم رعایت درز جداسازی: یکی از الزامات کلیدی در ضوابط جدید، ایجاد درز مناسب بین دیوار و اجزای سازه‌ای است. با این حال، در بسیاری از کارگاه‌ها این درز یا به‌طور کامل حذف می‌شود یا با مصالح سخت پر می‌گردد.(شکل ۲-۷)

پیامدهای این خطا:

ایجاد قید ناخواسته

افزایش تنش‌های فشاری و برشی در دیوار

ترک‌خوردگی در محل اتصال

(شکل ۲-۷) نمونه عدم رعایت درز جداسازی

کیفیت پایین اتصالات فلزی: عملکرد والپست به شدت وابسته به کیفیت اتصالات آن است. استفاده از جوشکاری غیر استاندارد، عدم رعایت طول جوش کافی یا اجرای نادرست صفحات اتصال، از جمله مشکلات رایج در کارگاه‌ها است. این موارد می‌تواند ظرفیت واقعی سیستم مهار را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد.

عدم انطباق اجرا با نقشه‌های مصوب: در بسیاری از پروژه‌ها، جزئیات اجرایی ارائه‌شده در نقشه‌ها به‌طور کامل در کارگاه اجرا نمی‌شود. این عدم انطباق معمولاً ناشی از کمبود نظارت مؤثر یا تغییرات سلیقه‌ای در حین اجرا است.

ضعف نظارت و کنترل کیفیت: یکی از ریشه‌ای‌ترین مشکلات در اجرای والپست، ضعف در نظام نظارت است. در بسیاری از موارد، کنترل‌های لازم در مراحل حساس مانند نصب وادارها، اجرای درزها و کنترل اتصالات به‌صورت سیستماتیک انجام نمی‌شود.این ضعف موجب می‌شود که حتی در صورت طراحی صحیح، عملکرد واقعی سیستم در زمان زلزله قابل اتکا نباشد.

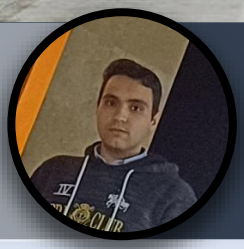
نتیجه‌گیری

بررسی الزامات فنی و تجربیات اجرایی نشان می‌دهد که والپست صرفاً یک عضو فلزی برای مهار دیوار نیست، بلکه بخشی از سیستم تأمین ایمنی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای ساختمان محسوب می‌شود. رویکرد جدید آیین‌نامه‌ها نیز بر همین مبنا شکل گرفته و به جای افزایش صلبیت دیوار، بر کنترل رفتار خارج از صفحه، حفظ پایداری دیوار و جلوگیری از انتقال نامطلوب تغییرشکل‌های سازه به اجزای بنایی تأکید دارد. با وجود تدوین ضوابط نسبتاً جامع در پیوست ششم استاندارد ۲۸۰۰ و دستورالعمل‌های مرتبط، بررسی پروژه‌های ساختمانی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مشکلات موجود ناشی از ضعف در مرحله اجرا است. اتصال صلب دیوار به قاب، حذف یا اجرای ناقص وادارها، عدم رعایت درزهای جداسازی، اجرای نادرست میلگرد بستر و ضعف کنترل کیفیت از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که می‌توانند عملکرد مورد انتظار سیستم مهار دیوار را با مخاطره مواجه کنند. بر این اساس، چالش اصلی صنعت ساختمان در حوزه والپست را نمی‌توان کمبود ضابطه یا ابهام فنی دانست؛ بلکه مسئله اصلی، فاصله میان الزامات طراحی و کیفیت اجرای آن‌ها در کارگاه است. کاهش این فاصله از طریق آموزش نیروهای اجرایی، ارتقای دانش مهندسان ناظر، استفاده از جزئیات اجرایی استاندارد و استقرار نظام کنترل کیفیت مؤثر، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش ایمنی دیوارهای غیرسازه‌ای و کاهش خسارات ناشی از زلزله داشته باشد. (شکل ۲-۸)

(شکل ۲-۸) نمونه ای از اجرا صحیح والپست

ژئو تکنیک ، راه ، ترابری و زیرساخت

مقایسه روسازی انعطاف‌پذیر و صلب



نویسنده :

امیرحسین آرمونتن
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

مقدمه

روسازی راه یکی از مهم‌ترین اجزای زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری محسوب می‌شود که عملکرد آن تأثیر مستقیمی بر ایمنی، هزینه‌های نگهداری، دوام شبکه راه و آسایش کاربران دارد. انتخاب نوع روسازی مناسب، به‌ویژه در معابر شهری با حجم ترافیک بالا، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. به‌طور کلی روسازی‌ها به دو دسته اصلی انعطاف‌پذیر و سخت تقسیم می‌شوند که هر یک دارای ویژگی‌های سازه‌ای، رفتاری و اقتصادی متفاوتی هستند.

تعریف و ساختار روسازی

روسازی انعطاف‌پذیر[1]: روسازی انعطاف‌پذیر شامل چندین لایه از مصالح مختلف شامل لایه رویه آسفالتی ، لایه اساس، لایه زیر اساس، بستر خاکی است. در این نوع روسازی، انتقال بار از طریق تماس دانه‌ها و توزیع تدریجی تنش در لایه‌ها صورت می‌گیرد. به دلیل ماهیت ویسکوالاستیک آسفالت، این روسازی تحت بارگذاری دچار تغییر شکل می‌شود و تنش به‌صورت تدریجی به لایه‌های زیرین منتقل می‌گردد.
مکانیزم انتقال بار در روسازی انعطاف‌پذیر وابسته به ضخامت لایه‌ها و کیفیت مصالح است و عملکرد آن به شدت تحت تأثیر شرایط ترافیکی و محیطی قرار دارد.

روسازی صلب[2]: روسازی صلب عمدتاً از بتن هیدرولیکی[3] تشکیل می‌شود که به‌صورت یک دال سخت و پیوسته بر روی لایه زیر اساس یا مستقیماً روی بستر قرار می‌گیرد. بر خلاف روسازی انعطاف‌پذیر، این نوع روسازی بار را از طریق سختی خمشی دال در سطح گسترده‌تری پخش می‌کند و وابستگی بسیار کمتری به کیفیت خاک بستر دارد.

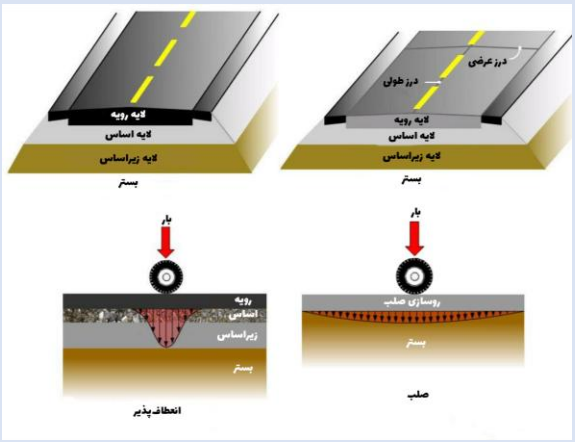
مکانیزم توزیع بار

مهم‌ترین تمایز بین دو نوع روسازی، نحوه توزیع بار وارده ناشی از چرخ وسایل نقلیه است:

در روسازی انعطاف‌پذیر، بار به‌وسیله لایه‌های مختلف و از طریق تماس ذرات با یکدیگر توزیع می‌شود.

در روسازی صلب، دال بتنی به‌عنوان یک عضو با سختی خمشی بالا عمل کرده و بار را در ناحیه وسیعتری به زیر منتقل می‌کند، بنابراین تنش وارده به خاک زیرین کمتر از حالت انعطاف‌پذیر است. (شکل۳-۱)

1 - Flexible Pavement
2 - Rigid Pavement
3 - PCC - Portland Cement Concrete



(شکل ۳-۱) تفاوت لایه های روسازی صلب و انعطاف پذیر و نحوه پخش بار آنها

طراحی روسازی

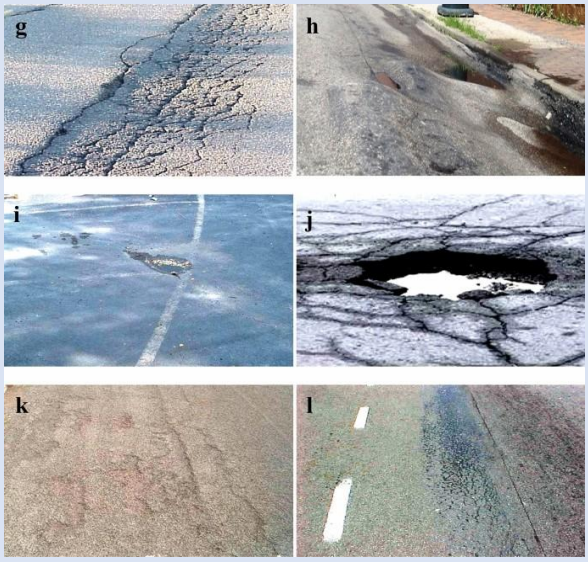
طراحی انعطاف‌پذیر : طراحی بر اساس تحلیل لایه‌ای و خصوصیات مصالح است که هدف آن تأمین ضخامت و مقاومت لازم برای تحمل بارهای ترافیکی در طول عمر طراحی است. طراحی انعطاف‌پذیر نیازمند اطلاعات دقیق از لایه‌های زیرین، مقاومت مصالح و بارهای ترافیکی است.

طراحی صلب : در روسازی صلب، انعطاف‌پذیری کمتر مصالح باعث می‌شود طراحی بر اساس سختی خمشی دال و انتقال بار از طریق دال انجام شود. این روش به‌طور گسترده توسط استانداردهای طراحی مانند (انجمن رسمی بزرگراه ها و حمل نقل ایالتی آمریکا)[1] مورد استفاده قرار می‌گیرد. (شکل۳-۲)

(شکل ۳-۲) تفاوت لایه های زیرین روسازی صلب و انعطاف پذیر

عملکرد روسازی‌ها در راه‌های شهری

تحقیقات نشان می‌دهد که در معابر شهری روسازی سخت در برابر بارهای سنگین و ترافیک مداوم عملکرد پایدارتری دارد. روسازی انعطاف‌پذیر در پروژه‌هایی با محدودیت زمان اجرا، گزینه مناسب‌تری محسوب می‌شود. ترک‌خوردگی در روسازی بتنی عمدتاً به صورت ترک‌های انقباضی یا حرارتی ظاهر می‌شود، در حالی که در روسازی آسفالتی شیارشدگی و تغییر شکل دائمی رایج‌تر است. (شکل۳-۳)



(شکل ۳-۳) مواردی از معایب روسازی آسفالتی

مزایا و محدودیت ها

روسازی انعطاف‌پذیر

مزایا :

- هزینه اولیه کمتر: معمولاً هزینه ساخت اولیه پایین‌تر از روسازی صلب است.
- زمان اجرای کوتاه‌تر: ساخت سریع‌تر و امکان بهره‌برداری زودتر.
- انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات بستر: بهتر می‌تواند به تغییرات کوچک بستر پاسخ دهد.

1 - AASHTO

محدودیت ها:

- نگهداری و تعمیرات مکرر: نیاز به روکش‌گذاری، ترمیم ترک‌ها و... در طول دوره خدمت دارد.
- خدمات‌دهی کمتر در برابر بارهای سنگین: در ترافیک بسیار سنگین ممکن است دچار نشست و چروک[1] شود.
- حساسیت بالاتری به تغییرات دمایی دارد.

روسازی صلب

مزایا :

- دوام زیاد: عمر خدماتی بیشتر (بیش از ۳۰ تا ۴۰ سال) و مقاومت خوب در برابر بارهای سنگین.
- نگهداری کمتر: نیاز به تعمیرات نسبتاً کمتر نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر دارد.
- پایداری در برابر تغییرات دما: به دلیل سختی بالا دچار ناهنجاری‌های زیاد حرارتی کمتر می‌شود.

محدودیت ها:

- هزینه اولیه بالاتر: هزینه بتن، قالب‌بندی و اجرای دقیق باعث هزینه بیشتری می‌شود.
- ترک‌خوردگی و نیاز به درز انبساط: به دلیل انبساط و انقباض حرارتی نیاز به درزها و کنترل ترک‌ها دارد.

مزایای فنی و اقتصادی روسازی بتن غلتکی :
مطالعه ای بر بررسی مشخصات روسازی بتن غلتکی تاکید دارد که این نوع روسازی علاوه بر دوام بالا، هزینه‌های ساخت و نگهداری کمتر نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر دارد.

همچنین به این نکته اشاره شده که بتن غلتکی نیاز به قالب‌بندی و پرداخت سطحی ندارد و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای راه‌های با ترافیک سبک و سنگین باشد، در حالی که برای بهبود زبری سطح آن می‌توان از روکش آسفالتی نازک استفاده کرد. (شکل۳-۴)

(شکل ۳-۴) اجرای روسازی بتن غلتکی

هزینه و تحلیل دوره عمر[2]

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که اگرچه هزینه اولیه ساخت روسازی انعطاف‌پذیر کمتر است، اما هزینه کل در دوره عمر به‌دلیل نگهداری و نیاز به روکش‌گذاری چندباره در طول زمان ممکن است از هزینه روسازی صلب بالاتر باشد
مطالعات موردی مختلف نشان داده‌اند که در تحلیل دوره عمر ۳۰ تا ۵۰ ساله :

- روسازی صلب در بیشتر سناریوها دارای هزینه کل کمتر یا رقابتی نسبت به روسازی انعطاف‌پذیر است.
- در شرایط ترافیک بسیار بالا و خاک ضعیف، مزیت اقتصادی روسازی صلب پررنگ‌تر می‌شود.

1 - Rutting
2 - Life-Cycle Cost

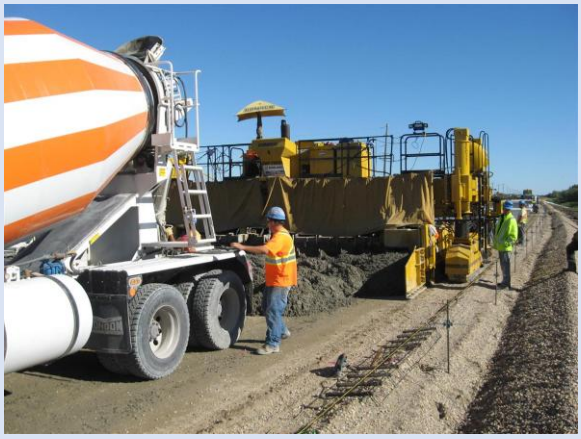
نتیجه‌گیری

ساختار و رفتار باربری روسازی انعطاف‌پذیر و صلب کاملاً متفاوت است و باید در طراحی و انتخاب نوع روسازی لحاظ گردد.

اگرچه هزینه اولیه روسازی انعطاف‌پذیر کمتر است، اما هزینه کل در دوره عمر به‌دلیل تعمیرات و روکش‌ها ممکن است از روسازی صلب بیشتر شود و عملکرد طولانی‌مدت و مقاومت بهتر روسازی صلب در برابر بارهای سنگین و شرایط نامساعد خاک، آن را برای پروژه‌های با حجم تردد بالا مناسب‌تر می‌کند.

برای تصمیم‌گیری بهتر باید تحلیل هزینه دوره عمر، شرایط خاک، ترافیک و الزامات محیطی انجام شود و به طور کلی انتخاب بین روسازی انعطاف‌پذیر و صلب وابسته به نیازهای پروژه است. (شکل۳-۵) و (شکل۳-۶)

(شکل ۳-۵) اجرای روسازی آسفالتی



(شکل ۳-۶) اجرای روسازی بتنی

مرمت، تعمیر و نگهداری

مقاوم‌سازی تیرهای بتنی و فولادی با استفاده از ورق‌های الیاف مرکب پلیمری

نویسندگان :

مهدی رستمی راوری
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

امیر حسین آرمونتن
دانشجوی کارشناسی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مقاوم‌سازی تیرهای بتنی و فولادی با استفاده از مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف[1] به‌عنوان یک راهکار کارآمد، اقتصادی و سریع در صنعت ساخت‌وساز مطرح شده است. این مقاله با مروری جامع بر مبانی نظری، انواع سیستم‌های الیاف مرکب، روش‌های اجرایی و نتایج پژوهش‌های تجربی، یک دیدگاه یکپارچه از این فناوری ارائه می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاربرد این مواد می‌تواند ظرفیت خمشی تیرهای بتنی را تا ۱۰۰ درصد و ظرفیت برشی آن‌ها را تا ۱۲۰ درصد افزایش دهد. در تیرهای فولادی نیز الیاف مرکب کربنی موجب بهبود قابل توجه در مقاومت خستگی، کمانش جانبی پیچشی و سختی الاستیک می‌گردد.

زیرساخت‌های سازه‌ای از جمله پل‌ها، ساختمان‌ها، سکوهای صنعتی و پارکینگ‌های طبقاتی در اثر گذر زمان، افزایش بارهای بهره‌برداری، خوردگی آرماتورها، آسیب‌های زلزله‌ای یا طراحی اولیه نامناسب دچار کاهش ظرفیت باربری می‌شوند. در چنین شرایطی، تصمیم‌گیری میان تخریب و بازسازی یا تقویت و مقاوم‌سازی از نظر فنی و اقتصادی اهمیت حیاتی دارد. طی دو دهه اخیر، مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف جایگاه ویژه‌ای در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود پیدا کرده‌اند.

این مواد که متشکل از الیاف با استحکام بالا (کربن، شیشه یا آرامید) در بستری از رزین پلیمری هستند، ویژگی‌هایی نظیر نسبت استحکام به وزن بسیار بالا، مقاومت عالی در برابر خوردگی، سهولت اجرا و اختلال حداقلی در بهره‌برداری جاری را با یکدیگر ترکیب می‌کنند.

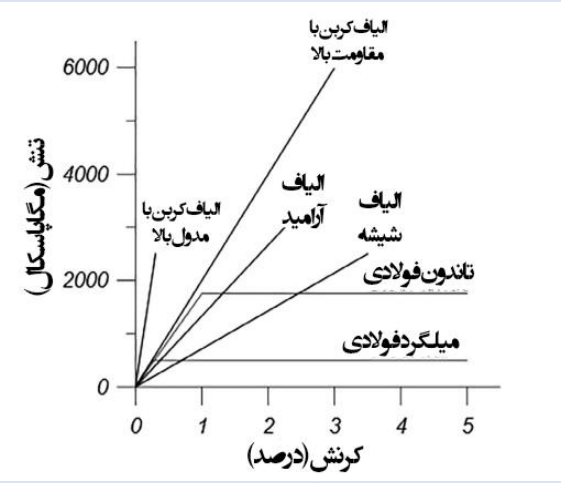
مواد الیاف مرکب پلیمری و خصوصیات مکانیکی

بر اساس نوع الیاف مصرفی، سه خانواده اصلی در مقاوم‌سازی سازه‌ای کاربرد دارند:

- الیاف مرکب کربنی : مدول الاستیسیته ۲۴۰ تا ۶۴۰ گیگاپاسکال ، مقاومت کششی ۱۷۰۰ تا ۶۰۰۰ مگاپاسکال ؛ بهترین عملکرد در تقویت خمشی و بهبود خستگی
- الیاف مرکب شیشه‌ای : ارزان‌ترین گزینه، مدول ۳۵ تا ۸۰ گیگاپاسکال؛ مناسب برای تقویت برشی و محصورسازی
- الیاف مرکب آرامیدی : مقاومت کششی بالا با جذب انرژی خوب؛ کاربرد در سازه‌های دریایی و پارکینگ

1 - Fiber Reinforced Polymer (FRP)

انتخاب نوع الیاف مرکب باید بر اساس سطح تقویت مورد نیاز، محیط بهره‌برداری، قابلیت اجرا و ملاحظات اقتصادی صورت گیرد. الیاف مرکب پلیمری رفتاری کاملاً الاستیک-خطی تا لحظه گسیختگی دارند، بدون هیچ ناحیه پلاستیک. این ویژگی تفاوت اساسی آن با فولاد را نشان می‌دهد. الگوی شکست در سیستم‌های الیاف مرکب چسبیده به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: (الف) گسیختگی الیاف در ناحیه کشش، و (ب) جدایش لایه‌ای که می‌تواند در سطح مشترک ورق - چسب، چسب–بتن یا درون لایه سطحی بتن رخ دهد. جدایش زودهنگام مهم‌ترین حالت شکست ترد در این سیستم‌ها به شمار می‌رود و باید در طراحی محدود گردد. (شکل۴-۱)



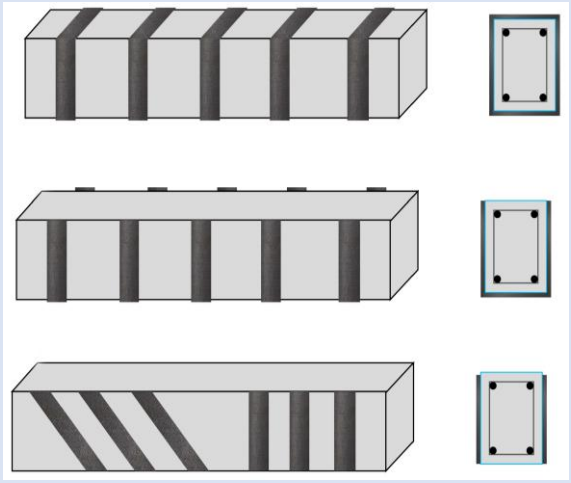
(شکل ۴-۱) مقایسه نمودار تنش-کرنش الیاف کربنی، شیشه‌ای، آرامیدی و فولاد

مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه با الیاف مرکب پلیمری

متداول‌ترین شیوه تقویت خمشی، الصاق لمینیت‌های الیاف مرکب به وجه کشش تیر (سطح زیرین) است. مکانیزم انتقال نیرو از بتن به ورق از طریق چسب اپوکسی صورت می‌گیرد. پیش از اجرا، آماده‌سازی سطح از اهمیت بالایی برخوردار است: سطح بتن باید تمیز، خشک و با زبری مناسب باشد تا اتصال چسبی کافی حاصل شود.

معیار طراحی خمشی در اغلب آیین‌نامه‌ها از جمله آیین‌نامه بتن آمریکا و فدراسیون بین‌المللی بتن بر محدود کردن کرنش نهایی الیاف برای جلوگیری از جدایش ناگهانی تأکید دارد. ضریب کاهش کرنش اثربخش معمولاً در محدوده ۷۰ تا ۸۵ درصد کرنش پارگی الیاف قرار می‌گیرد.

سه الگوی اصلی آرایش الیاف مرکب در تقویت برشی وجود دارد: پیچش سه‌وجهی ، دوطرفه و محیطی (کامل). در تیرهایی که دسترسی به سطح فوقانی امکان‌پذیر نیست، پیچش سه‌وجهی متداول‌ترین روش است. الیاف عموماً در زاویه ۹۰ یا ۴۵ درجه نسبت به محور تیر نصب می‌شوند و در اکثر پژوهش‌ها آرایش ۴۵ درجه عملکرد برشی بهتری از خود نشان داده است. (شکل ۴-۲)



(شکل ۴-۲) الگوهای مختلف اجرای الیاف مرکب برای تقویت برشی تیرهای بتنی: پیچش سه وجهی، دوطرفه و محیطی (کامل)

مسائل عملی اجرا

فرایند اجرای الیاف مرکب به‌صورت میدانی شامل مراحل زیر است: آماده‌سازی سطح (سندبلاست یا چکش‌کاری)، تمیزکاری با هوای فشرده، پرکردن ترک‌ها و ناهمواری‌ها با اپوکسی، اعمال پرایمر، چسب‌کاری و الصاق لمینیت یا پارچه الیاف، و سپس عمل‌آوری در دمای محیط. دمای اجرا نباید کمتر از ۵ و بیشتر از ۳۵ درجه سانتیگراد باشد.

تحقیقات نشان می‌دهد که تا ۶۰ درصد از موارد شکست زودهنگام به دلیل آماده‌سازی ناکافی سطح رخ می‌دهد.

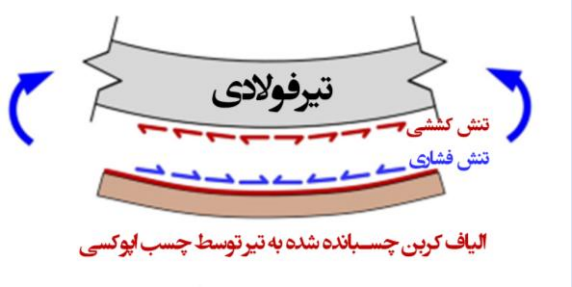
زبری سطح بتن باید به گونه‌ای باشد که مقاومت کششی پیوند اپوکسی-بتن از ۱/۵ مگاپاسکال تجاوز کند. آزمون کشش سطحی ابزار استاندارد تأیید کیفیت اتصال است.

مقاوم‌سازی تیرهای فولادی با الیاف مرکب پلیمری

تقویت تیرهای فولادی با الیاف مرکب تفاوت‌های اساسی با تیرهای بتنی دارد. در اینجا اتصال چسبی به سطحی صلب و کم‌تخلخل (فولاد) انجام می‌شود که در اصل مزیت بزرگی محسوب می‌گردد، اما حساسیت اتصال به رطوبت، آلودگی روغنی و پوشش‌های رنگی باقیمانده نیز بیشتر است. علاوه بر این، تفاوت ضریب انبساط حرارتی فولاد و الیاف کربنی می‌تواند در محیط‌های با دمای متغیر ایجاد تنش‌های چرخه‌ای در خط اتصال نماید.

مهم‌ترین کاربردهای الیاف مرکب در تقویت تیرهای فولادی عبارتند از:

- کاهش تنش و افزایش عمر خستگی: الصاق ورق الیاف کربنی به ناحیه کشش جان یا بال پایینی تیر، دامنه تنش را کاهش می‌دهد و نرخ رشد ترک خستگی را به طور چشمگیری کند می‌سازد. (شکل۴-۳)
- افزایش ظرفیت خمشی: لمینیت‌های الیاف کربنی با استحکام بالا (مدول بیش از ۲۳۰ گیگاپاسکال) موجب تقویت معنادار خمشی تیرهای فولادی می‌شوند.
- کنترل کمانش جانبی-پیچشی : الصاق الیاف مرکب به بال فشاری یا تقویت جان تیر، سختی پیچشی را افزایش داده و فاصله مهاری بحرانی را بیشتر می‌کند.
- تقویت ناحیه جان تحت بارهای موضعی و برشی: ورق‌های الیاف مرکب به صورت عمودی بر روی جان تیر فولادی الصاق می‌شوند.



(شکل ۴-۳) الصاق لمینیت الیاف کربنی به بال تحت کشش تیر فولادی و توزیع تنش در مقطع تقویت‌شده

دو روش اصلی اتصال الیاف مرکب به تیرهای فولادی به کار می‌رود: ۱- اتصال چسبی با اپوکسی‌های دوجزئی سازه‌ای که باید با دمای اجرا سازگار باشند، و ۲- اتصال مکانیکی با بولت یا پیچ که در موارد حساس به لایه‌برداری به کار می‌رود. در اغلب پروژه‌های اخیر، اتصال ترکیبی به‌عنوان راهکار بهینه معرفی شده است.

مقایسه تطبیقی و جمع‌بندی

در هر دو نوع تیر، جدایش لایه‌ای مهم‌ترین الگوی شکست نامطلوب است. برای کنترل آن، استانداردها محدودیت‌هایی بر کرنش نهایی اعمال می‌کنند. آنکراژ انتهای ورق با استفاده از پیچش سه‌وجهی یا دوخت در مناطق لنگر پوچ می‌تواند ظرفیت سیستم را تا ۲۵ درصد افزایش دهد.

علیرغم هزینه اولیه بالاتر مواد الیاف مرکب، تحلیل چرخه عمر هزینه نشان می‌دهد که این روش در بسیاری از موارد از لحاظ هزینه کلی نسبت به روش‌های سنتی (ژاکت بتنی یا ورق فولادی جوشی) مزیت دارد؛ زیرا هزینه‌های توقف بهره‌برداری، داربست‌بندی، قالب‌بندی و نگهداری آینده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. (شکل۴-۴)

(شکل ۴-۴) مقایسه اجرای عملی مقاوم سازی تیر فولادی و بتنی پل با ورق‌های الیاف کربنی در یک پروژه واقعی

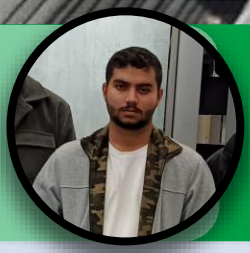
نتیجه‌گیری

مقاوم‌سازی تیرها با ورق‌های الیاف مرکب فناوری بالغ و مستنداتی است که در سراسر جهان پذیرفته شده و در قالب آیین‌نامه‌های معتبر از جمله آیین‌نامه بتن آمریکا ، مقررات فدراسیون بین‌المللی بتن و استاندارد بین‌المللی قابل طراحی و اجراست. یافته‌های این مقاله را می‌توان به شرح روبرو خلاصه کرد:

- الیاف مرکب پلیمری می‌تواند ظرفیت خمشی تیرهای بتنی را تا ۱۰۰٪ و ظرفیت برشی را تا ۱۲۰٪ افزایش دهد.
- در تیرهای فولادی، الیاف کربنی با مدول بالا بهترین عملکرد را در بهبود خستگی، خمش و کنترل کمانش جانبی نشان می‌دهد.
- کیفیت آماده‌سازی سطح و اجرای صحیح اتصال چسبی عوامل تعیین‌کننده در عملکرد بلندمدت سیستم هستند.
- طراحی باید با توجه به محدودیت کرنش الیاف، الگوی شکست هدف و شرایط محیطی صورت پذیرد.
- تحلیل هزینه-فایده در بسیاری از موارد به نفع الیاف مرکب نسبت به روش‌های سنتی است.
- با توسعه الیاف مرکب پیش‌تنیده و ترکیب آن با پایش سلامت سازه ، این فناوری در سال‌های آینده رشد بیشتری خواهد داشت.

فناوری های نوین عمران و محیط زیست

تحول طراحی و مهندسی در خانه‌های چاپ سه‌بعدی[1]



نویسنده :
ابوالفضل باغگلی
دانشجوی کاردانی عمران
دانشکده شهید چمران کرمان

مقدمه

چاپ سه‌بعدی در ساخت‌وساز به عنوان یکی از نوظهورترین فناوری‌ها، الگوهای سنتی طراحی معماری و مهندسی سازه را به چالش کشیده است. این فناوری با بهره‌گیری از فرآیند لایه‌به‌لایه و هدایت دیجیتال، امکان ساخت مستقیم اجزای ساختمانی یا کل بنا را بدون نیاز به قالب‌بندی سنتی فراهم می‌کند.مطالعات مروری اخیر نشان می‌دهند که چاپ سه بعدی نه‌تنها یک ابزار اجرایی جدید، بلکه یک الگوی فکری نوین در طراحی و مهندسی ساختمان محسوب می‌شود که نیازمند بازتعریف مفاهیم سازه‌ای، مصالح، فرآیند ساخت و حتی آیین‌نامه‌های طراحی است.

تکامل سامانه‌های چاپ

سامانه‌های چاپ سه‌بعدی ساختمانی عمدتاً شامل سه دسته هستند:

- چاپگرهای دروازه‌ای[2] (شکل ۵-۱)

(شکل ۵-۱) ساخت با چاپگرهای دروازه ای

- بازوهای رباتیک[3] (شکل ۵-۲)

(شکل ۵-۲) ساخت با بازوهای رباتیک

- جرثقیل متحرک[4] (شکل ۵-۳)

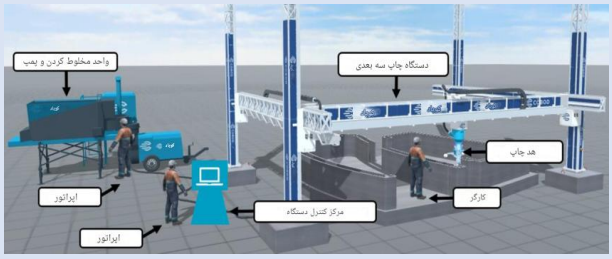
(شکل ۵-۳) ساخت با جرثقیل متحرک

1 - 3D Construction Printing
2 - Gantry-based systems
3 - Robotic arm systems
4 - Crane-based systems

مطالعات نشان می‌دهد که نسل‌های اولیه این سامانه‌ها محدود به چاپ دیوارهای ساده با هندسه خطی بودند، اما پیشرفت در کنترل عددی، رباتیک و نرم‌افزارهای طراحی پارامتریک، امکان چاپ فرم‌های پیچیده و سازه‌های بزرگ‌مقیاس را فراهم کرده است.

گذار از نمونه‌سازی به ساخت واقعی در مراحل ابتدایی، تمرکز تحقیقات بر امکان‌سنجی فناوری و چاپ نمونه‌های آزمایشگاهی بود. اما پژوهش‌های دهه اخیر نشان می‌دهد که چاپ سه بعدی وارد مرحله ساخت واقعی خانه‌ها و واحدهای مسکونی شده است.

بررسی‌های منتشرشده در ژورنال مهندسی ساختمان[1] نشان می‌دهد که بسیاری از پروژه‌های اجراشده توانسته‌اند الزامات اولیه سازه‌ای را برآورده کنند ، هرچند هنوز فاصله قابل‌توجهی تا پذیرش کامل مقرراتی وجود دارد. (شکل ۵-۴)



(شکل ۵-۴) شماتیک مراحل کلی ساخت چاپ سه بعدی به روش چاپگرهای دروازه‌ای

تحول در طراحی معماری

آزادی فرم و طراحی پارامتریک : یکی از مهم‌ترین پیامدها چاپ سه بعدی، آزادی بی‌سابقه در طراحی معماری است. محدودیت‌های ناشی از قالب‌بندی، نیروی انسانی و ابزارهای سنتی تا حد زیادی حذف شده‌اند. بر اساس مطالعات منتشرشده در ژورنال ساختمان ها[2]، طراحی در پروژه‌های چاپ سه‌بعدی عمدتاً مبتنی بر مدل‌سازی پارامتریک و الگوریتمی است که امکان بهینه‌سازی هم‌زمان فرم، سازه و مصرف مصالح را فراهم می‌کند. (شکل ۵-۵)

(شکل ۵-۵) پروژه **TECLA** در ایتالیا که به روش چاپ سه بعدی و با استفاده از خاک های محلی ساخته شده است

یکپارچگی اجزا و طراحی پارامتریک :

مبلمان بتنی یکپارچه: امکان چاپ هم‌زمان نیمکت‌ها، باغچه‌های متصل به بنا و عناصر تزیینی به عنوان بخشی از بدنه اصلی ساختمان فراهم شده است. (شکل ۵-۶)

شخصی‌سازی انبوه: برخلاف تولید انبوه سنتی، در این فناوری می‌توان هر واحد را مطابق با سلیقه مشتری و با استفاده از الگوریتم‌های پارامتریک (مانند مارپیچ فیبوناچی) طراحی و اجرا کرد.

1 - Journal of Building Engineering
2 - Buildings Journal

(شکل ۵-۶) نمونه های ساخته شده از صندلی و مبلمان با چاپ سه بعدی

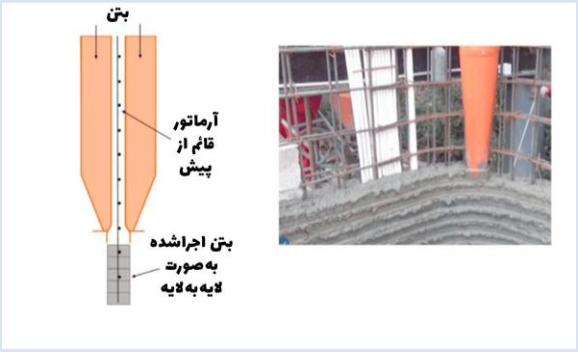
یکپارچگی طراحی و ساخت[1]: در چاپ سه بعدی، برخلاف روش‌های سنتی که طراحی و اجرا دو مرحله مجزا هستند، در چاپ سه‌بعدی ساختمان، طراحی مستقیماً به داده‌های اجرایی تبدیل می‌شود. این یکپارچگی باعث شده است که معماران و مهندسان از همان مراحل اولیه طراحی، محدودیت‌ها و قابلیت‌های چاپ را در نظر بگیرند.

تحولات مهندسی سازه در خانه‌های چاپ سه‌بعدی

بازتعریف سیستم‌های باربر: تحقیقات نشان می‌دهد که سازه‌های چاپ‌شده غالباً فاقد سیستم‌های کلاسیک تیر- ستون هستند و انتقال بار از طریق دیوارهای چاپی با مقاطع خاص و هندسه بهینه‌شده صورت می‌گیرد. این مسئله منجر به توسعه رویکردهای جدید تحلیل سازه‌ای شده است.

رفتار مکانیکی و ناهمسانگردی: یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی سازه چاپی، ناهمسانگردی مکانیکی ناشی از فرآیند لایه‌به‌لایه است. مطالعات آزمایشگاهی منتشرشده درساخت و ساز و مصالح ساختمانی[2] نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و کششی بتن چاپی به جهت بارگذاری نسبت به لایه‌ها وابسته است.

تقویت سازه‌ای: پژوهش‌های اخیر به استفاده از میلگردهای پلیمر تقویت‌شده با الیاف[3]، کابل‌های فولادی و الیاف داخلی برای افزایش ظرفیت باربری سازه‌های چاپی پرداخته‌اند. مقاله‌ای درگزارش‌های علمی (نیچر)[4] نشان می‌دهد که ستون‌های چاپی مسلح‌شده می‌توانند عملکرد قابل‌قبولی تحت بار فشاری محوری از خود نشان دهند. (شکل ۵-۷)



(شکل ۵-۷) اجرای بتن در صورت استفاده آرماتور میانی، در چاپ سه بعدی

تحولات مصالح و طراحی مخلوط

الزامات مواد قابل چاپ: مواد مورد استفاده در چاپ سه بعدی باید به‌طور هم‌زمان دارای قابلیت پمپاژ، اکستروژن‌پذیری، حفظ شکل و مقاومت مکانیکی کافی باشند. این الزامات باعث توسعه مخلوط‌های سیمانی ویژه‌ای شده است که با بتن سنتی تفاوت اساسی دارند.

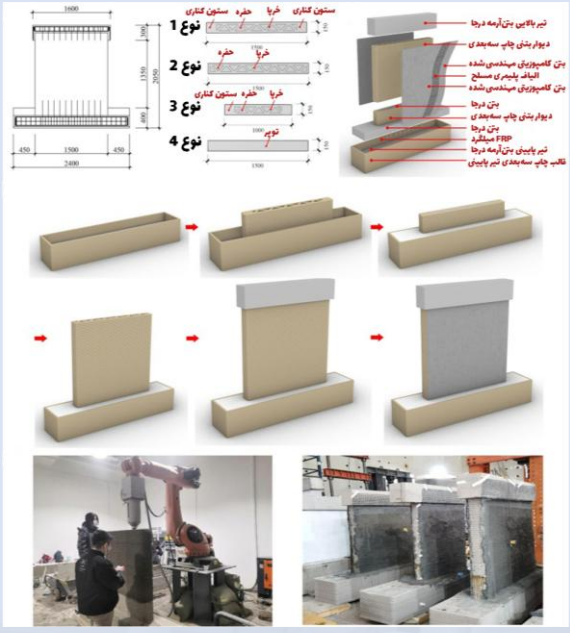
افزودنی‌ها و پایداری محیطی: مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های معدنی مانند سرباره، خاکستر بادی و میکروسیلیس می‌تواند هم خواص چاپ‌پذیری و هم پایداری زیست‌محیطی بتن چاپی را بهبود دهد.

1 - DfAM- Design for Additive Manufacturing
2 - Construction and Building Materials
3 - FRP-Fiber Reinforced Polymer
4 - Scientific Reports (Nature)

شبیه‌سازی، کنترل کیفیت و هوش مصنوعی

مدل‌سازی عددی: مدل‌سازی المان محدود برای شبیه‌سازی فرآیند چاپ و پیش‌بینی تغییرشکل لایه‌ها نقش کلیدی دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که این مدل‌ها می‌توانند در کاهش خطاهای چاپ و بهینه‌سازی پارامترهای اجرایی مؤثر باشند.

رویکردهای داده‌محور: در سال‌های اخیر، استفاده از یادگیری ماشینی و تحلیل داده‌محور برای پیش‌بینی رفتار مخلوط‌ها و بهینه‌سازی فرآیند چاپ مورد توجه قرار گرفته است. این رویکردها می‌توانند زمان آزمون‌های آزمایشگاهی را کاهش دهند و کیفیت ساخت را افزایش دهند. (شکل ۵-۸)



(شکل ۵-۸) مدل سازی دیوار به روش چاپ سه بعدی و آنالیز آن

چالش‌ها و محدودیت‌ها

علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر، فناوری چاپ سه بعدی با چالش‌هایی جدی مواجه است، از جمله:

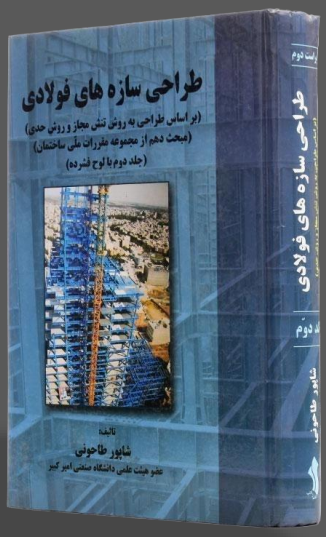
- نبود آیین‌نامه‌های طراحی و استانداردهای سازه‌ای جامع
- عدم قطعیت در دوام بلندمدت سازه‌های چاپی
- محدودیت در مقیاس‌پذیری و یکپارچه‌سازی تأسیسات
- نیاز به نیروی متخصص چندرشته‌ای

مطالعات مروری تأکید می‌کنند که عبور از این چالش‌ها مستلزم همکاری میان مهندسی عمران، معماری، علم مواد و علوم داده است.

چشم‌انداز آینده و نتیجه‌گیری

تحلیل منابع علمی نشان می‌دهد که چاپ سه‌بعدی ساختمان‌ها از یک فناوری آزمایشگاهی به سمت یک روش بالقوه ساخت‌وساز پایدار و دیجیتال‌محور در حال حرکت است. تحول در طراحی و مهندسی خانه‌های چاپ سه‌بعدی نه‌تنها به تغییر ابزارها، بلکه به بازاندیشی مفاهیم بنیادین طراحی سازه و معماری منجر شده است. انتظار می‌رود با توسعه استانداردها، بهبود مواد و پیشرفت هوش مصنوعی، نقش چاپ سه بعدی در آینده صنعت ساختمان پررنگ‌تر شود.

معرفی کتاب

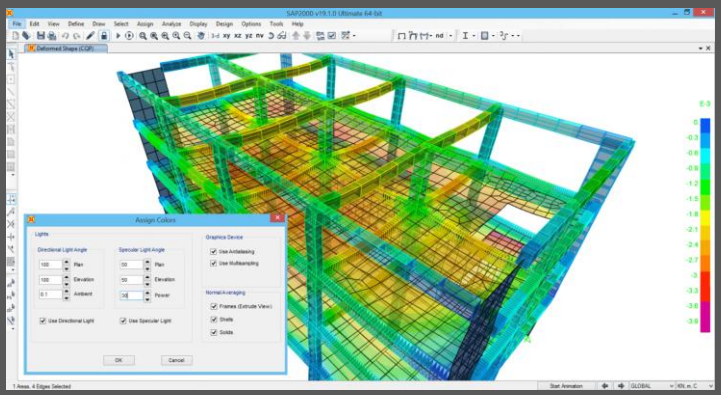


کتاب «طراحی سازه‌های فولادی» اثر "شاپور طاحونی" (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر) یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین منابع آموزشی در رشته مهندسی عمران، گرایش سازه، در ایران است. این کتاب مبانی و اصول طراحی اعضای فولادی را بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر و روش‌های LRFD و ASD به صورت گام به‌گام آموزش می‌دهد. مباحثی مانند اعضای کششی، تیرها، ستون‌ها، اتصالات پیچی و جوشی، تیرورق‌ها و طراحی ساختمان‌های فولادی به‌طور جامع در آن بررسی شده‌اند. همچنین مثال‌های حل‌شده فراوان و توضیحات تشریحی، یادگیری مفاهیم را برای دانشجویان و مهندسان آسان‌تر می‌کند. این اثر بیش از ۱۰۰۰ صفحه دارد و سال‌هاست به‌عنوان یکی از منابع اصلی درس سازه‌های فولادی در دانشگاه‌های ایران تدریس می‌شود. به دلیل جامعیت، دقت علمی و رویکرد آموزشی مناسب، بسیاری از داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد و آزمون نظام مهندسی نیز از آن استفاده می‌کنند.

معرفی نرم افزار

نرم‌افزار **SAP2000** یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای مهندسی عمران در زمینه تحلیل و طراحی سازه‌ها است. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش اجزای محدود، امکان مدل‌سازی، تحلیل و طراحی انواع سازه‌های فولادی، بتنی و کامپوزیتی را فراهم می‌کند.

SAP2000 قابلیت انجام تحلیل‌های استاتیکی، دینامیکی، غیرخطی و لرزه‌ای را داشته و در پروژه‌های پیچیده عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محیط کاربری مناسب، دقت بالا در محاسبات و امکانات گسترده برای بررسی رفتار سازه، از ویژگی‌های مهم این نرم‌افزار محسوب می‌شود.



منابع

۲-۱ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. (۱۳۹۳). استاندارد ۲۸۰۰ ایران: آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (ویرایش چهارم، پیوست ششم: طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای معماری). تهران، ایران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

۲-۲ سازمان برنامه و بودجه کشور. (۱۳۹۷). نشریه شماره ۸۱۹: راهنمای طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای معماری. تهران، ایران: معاونت نظام فنی و اجرایی.

۲-۳ دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان. (۱۳۹۸). مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان: طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی. تهران، ایران: وزارت راه و شهرسازی.

1-1 Mesri, G., & Funk, J. R. (2015). Settlement of the Kansai International Airport Islands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(2), Article 04014102.

1-2 Packer, J. A., & Wardenier, J. (1994). Kansai International Airport Terminal Building — The Design. The Structural Engineer, 72(18). The Institution of Structural Engineers (IStructE).

1-3 Renzo Piano Building Workshop. (1994). Kansai International Airport Passenger Terminal Building. Fondazione Renzo Piano.

1-4 American Society of Civil Engineers (ASCE). (2001). Civil Engineering Monuments of the Millennium: Airport Design and Development — Kansai International Airport. ASCE.

1-5 Kansai Airports Co., Ltd. (2023). Technologies for Offshore Airports: Approach to Settlement. Kansai International Airport Co., Ltd.

1-6 Engineering Timelines. (2024). Kansai International Airport Terminal Building. Engineering Timelines.

1-7 Institution of Civil Engineers (ICE). (2024). Kansai Airport: An Engineering Wonder on Water. ICE.

منابع

2-1 American Society of Civil Engineers. (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

2-2 Federal Emergency Management Agency. (2011). Reducing the risks of nonstructural earthquake damage: A practical guide (FEMA E-74). Washington, DC: U.S. Department of Homeland Security.

2-3 Tomaževič, M. (1999). Earthquake-resistant design of masonry buildings. London, England: Imperial College Press.

3-1 M. V. Mohod & K. N. Kadam, “A Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review,” International Journal, May 2016.

3-2 M. Deniz, “Life Cycle Cost Comparison of Flexible and Rigid Pavements Under Different Traffic, Soil and Environmental Conditions,” M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2023.

3-3 Shaafan A. Taher, Sheyan Alyousify & Hussein J. A. Hassan, “Comparative Study of Using Flexible and Rigid Pavements for Roads: A Review Study,” The Journal of The University of Duhok, Vol. 23, No. 2, Dec. 2020.

3-4 PavementPedia Staff, “Key Differences Between Flexible and Rigid Pavements,” PavementPedia, 7 Jul. 2025.

3-5 CivilEngineeringPortal – Editorial Team, “Differences between Rigid and Flexible Pavement,” CivilEngineeringPortal.com.

3-6 Magdy I. Salama, Amal Elayat, Mahmoud Reda & Galal Elsamak, “Influence of Concrete Type on Rigid Pavement Behavior Under Static Loads,” Journal / Springer Nature, 2024.

3-7 Kurniawan, A., Petronio, M. C. da S., & Sharma, S. (2024). Comparative Study of Rigid and Flexible Pavement Performance in Urban Roads. RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, Vol. 2, No. 1, pp. 1–9.

منابع

4-1 ACI Committee 440. (2017). ACI 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

4-2 fib. (2019). fib Bulletin 90: Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures. Fédération internationale du béton, Lausanne, Switzerland.

4-3 Hollaway, L. C., & Cadei, J. (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Progress in Structural Engineering and Materials.

4-4 Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., & Lam, L. (2002). FRP Strengthened RC Structures. John Wiley & Sons, Chichester, UK.

4-5 Colombi, P., & Poggi, C. (2006). An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. Composites Part B: Engineering.

4-6 Siddiqui, N. A. (2009). Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites. Latin American Journal of Solids and Structures.

4-7 Zhao, X. L., & Zhang, L. (2007). State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. Engineering Structures.

4-8 Triantafillou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites. ACI Structural Journal.

5-1 Buswell, R. A., et al. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research.

5-2 Buswell, R. A., et al. (2020). A process classification framework for digital construction platforms. Automation in Construction.

منابع

5-3 Panda, B., et al. (2017). Mechanical properties of 3D printed concrete. Construction and Building Materials.

5-4 Rodrigo Teixeira Schossler, Shafi Ullah, Zaid Alajlan & Xiong Yu.(2025) data-driven analysis in 3D concrete printing: predicting and optimizing construction mixtures.

5-5 De Corte,Wouter. , Ooms,Ticho. , Vantyghem, Gieljan . (2020) FEM modelling techniques for simulation of 3D concrete printing.

از تمامی دانشجویان صمیمانه دعوت میگردد تا با ارائه مطالب علمی در حوزه عمران و همچنین در بخش های فنی و گرافیکی نشریه ما را در ارتقاء هرچه بهتر محتوا و ظاهر آن یاری رسانند. همچنین از اساتید محترم نیز تقاضا میشود با حضور ارزشمند، مشارکت و بازبینی در مطالب و محتوای نشریه بر غنای آن بیافزایند.

از تمامی اساتید، دانشجویان و مسئولین محترم که در تهیه، تدوین و انتشار این نشریه یاری دادند؛ کمال تشکر را داریم.

راه های ارتباطی :

@anjoman_azhand_omran

azhandscienceassociation@gmail.com

kerman.tvu.ac.ir