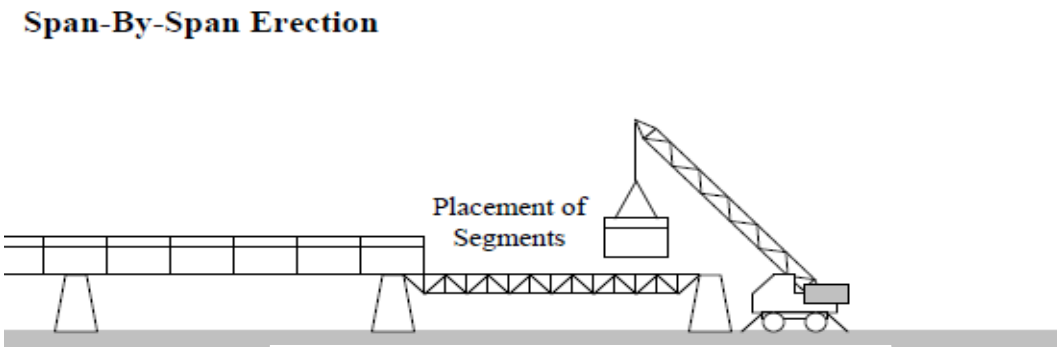
فصل سیزدهم: روش‌های ساخت پل‌ها

۱ – روش دهانه به دهانه (Span-by-Span)

روش دهانه به دهانه یکی از روش‌های اصلی اجرای پل‌های چند دهانه است همان طور که از اسم این روش پیدا است، در این روش، شاهتیر را در یک دهانه‌ی پل به طور کامل نصب می‌کنند و سپس نصب را در دهانه‌ی بعدی آغاز می‌کنند. به همین ترتیب ادامه می‌دهند تا نصب شاهتیرهای پل تمام شود. این روش ساخت اجازه می دهد کل دهانه در یک زمان نصب شود. این روش، بر حسب نوع روشی که در اجرا به کار می‌رود و وسایلی که در اجرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، به زیرمجموعه‌های زیر تقسیم می‌شود:

۱) Full Span Method(FSM)
۲) Moveable Scaffolding Method(MSS)
۳) خرپای موقت
۴) روش لغزش به پهلو

ابتدا به معرفی کلی روش دهانه به دهانه پرداخته می شود. در سال ۱۹۹۵ Levintov ویژگی و شاخصه‌های اصلی روش دهانه به دهانه را به عنوان مونتاژ کردن تمامی قطعات جهت ساخت یک دهانه را به صورت « قرار دادن قطعات در یک ردیف، اتصال آنها و پس‌تنیدگی طولی آنها به همدیگر برای ساخت دهانه کامل» طرح‌بندی کرد. قاعده کلی روش ساخت دهانه به دهانه در شکل زیر نشان داده می‌شود:



شکل (۲-۱): نمایی کلی از روش دهانه به دهانه

روش دهانه به دهانه محدود به پل‌هایی است که دارای عرشه صندوقه‌ای و با عمق ثابت هستند.

حالت‌های مختلف ساخت با استفاده از روش دهانه به دهانه به این صورت می‌باشد که، قطعات می‌توانند در ابتدا در روی زمین بهم مونتاژ شوند و توسط یک جرثقیل قوی بصورت یک مجموعه بالا برده شده و در جای خود قرار داده شوند (روش FSM)؛ و یا این که می‌توانند همگی در موقعیت نهایی خود بر روی شاهتیرِ نصب در امتداد دهانه قرار داده شده و دهانه را کامل نمایند. روش دوم به عنوان نمونه در ساخت پل دره‌ای بین ایالتی Biloxi I-110 استفاده شده است. در این پروژه شاهتیرهای نصب مختلفی در ساخت دهانه‌ها استفاده شده است. در برخی دهانه‌ها از خرپاهای مثلثی استفاده شد و در برخی قسمت‌ها از شاهتیرهای جعبه‌ای فولادی برای این کار بهره گرفته شده که البته فضای خالی بیشتری را در زیر پل جهت عبور و مرور فراهم می‌آورد.

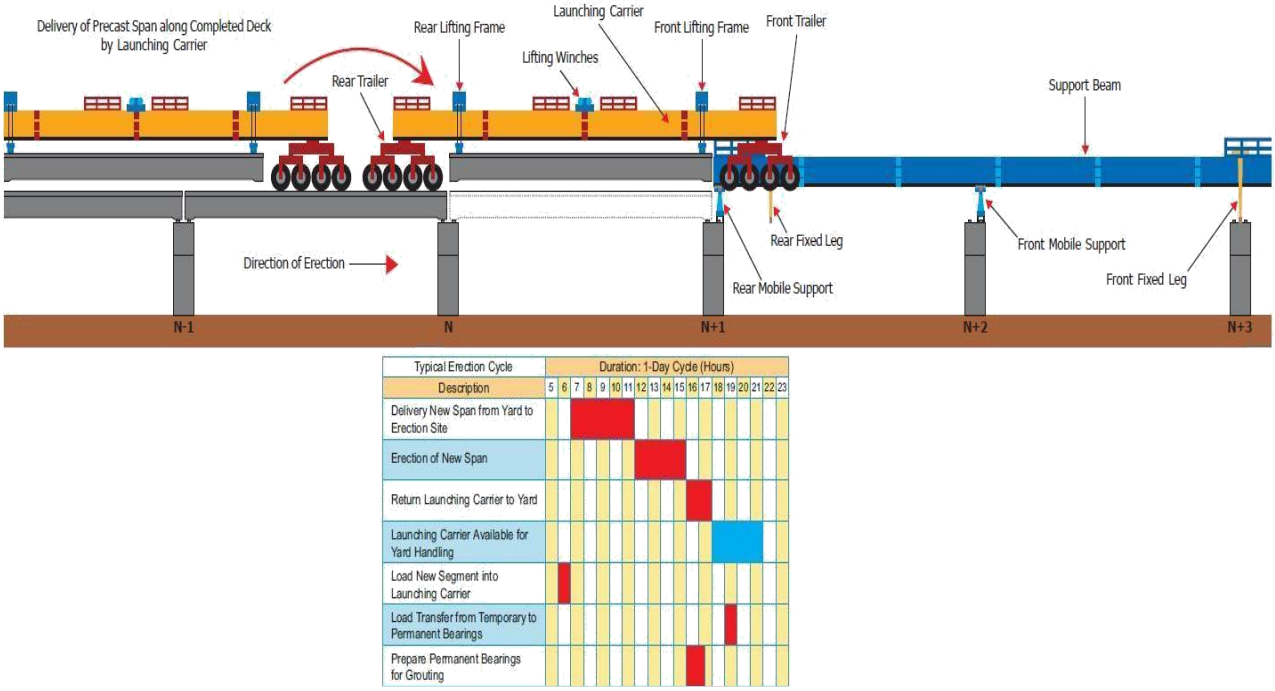
شاهتیرهای نصب در دو انتهای خود توسط داربست‌های فلزی که بر پایه‌های پل تکیه داشتند، نگه‌داری می شدند. بعد از اتمام ساخت یک دهانه، شاهتیرهای نصب به سمت جلو و دهانه‌ی بعدی پیشروی می‌کردند و تنظیم می شدند. پس از آن قطعات پیش‌ساخته که قبلاً آماده شده بودند توسط جرثقیل بالا برده شده و در جای خود قرار داده می‌شوند. تنظیم دقیق قطعات در جای خود و بر روی شاهتیرِ نصب به وسیله‌ی تکیه‌گاه‌های انفرادیِ تغییرپذیر، امکان‌پذیر است. بعد از همه این مراحل، پس‌تنیدگی جهت اتصال و پیوستگی بین تمام قطعات صورت می‌گیرد تا یک دهانه‌ی کامل شکل گیرد.

با روشی که توصیف گردید، سرعت ساخت می‌تواند به ۱ دهانه ظرف ۳/۵ روز برسد. شاهتیر نصب نیازی به تکیه کردن بر زمین ندارد، ولی می‌تواند به روسازه و زیرسازه موجود تکیه کند. برای مثال پایه‌های دهانه‌ای که در حال ساخت است می‌تواند بدین منظور استفاده گردد. طراحی خاص روسازه و زیرسازه و ملاحظات مربوط به آنها مثل ارتفاع آزاد زیر پل، یکسری مرزها و محدودیت‌ها را در طراحی و ساخت شاهتیرهای نصب وارد می‌کند.

۱-۱ روش تمام دهانه Full span method (FSM)

یکی از روش‌های متعدد این بخش که در مطالب فوق به آن اشاره شد روش تمام دهانه یا به اختصار FSM است که با توجه به روش‌های نوین پل‌سازی، امروزه با استفاده از تکنیک‌های پیشرانی این روش را با نام Full span precast & launching method یا FPLM می‌شناسند. در این روش کل دهانه را می‌توان در روی زمین اجرا یا

سرهم کرد و با استفاده از یک دستگاه بارج معلق و جرثقیل یا دستگاه FSM در محل خود نصب نمود. از ویژگی‌های بارز این روش، سرعت زیاد و کیفیت بالای ساخت است.



شکل (۲-۲): نمایی کلی از روش FSM

در این روش، ابتدا در محل تولید، قطعه پیش ساخته به طول یک دهانه کامل آرماتوربندی می‌شود، سپس غلاف‌های پیش‌تنیدگی در سرتاسر قطعه در محل و مختصات تعریف شده در نقشه، داخل آرماتورها جاگذاری می‌شوند و بعد از آن شیپوری‌های چدنی پیش‌تنیدگی (Anchor Plate) روی بدنه قالب نصب گردیده و قالب بندی تکمیل می‌گردد.

شکل (۲-۳): کارگاه ساخت قطعات پیش‌ساخته

در این مرحله قطعه پیش ساخته آماده بتن‌ریزی می‌باشد که پس از بتن‌ریزی، کابل‌های پیش‌تنیدگی از داخل غلاف‌ها عبور داده می‌شوند و گیره‌های پیش‌تنیدگی در دو انتهای قطعه نصب می‌گردند.

پس از کسب مقاومت مطلوب از بتن، کابل‌های پیش‌تنیدگی به وسیله جک چند رشته‌ای کشیده شده و پس از کشش اضافه کابل‌ها بریده می‌شوند. سپس عملیات تزریق دوغاب سیمان به داخل غلاف‌ها صورت می‌پذیرد.

دراین زمان قطعه آماده حمل به محل دپو یا روی عرشه، جهت نصب می‌باشد. قطعه‌ی پیش ساخته به وسیله جرثقیل روی یک دستگاه تریلی چند محوره قرار داده می‌شود و سپس به محل ساخت پل انتقال داده می‌شود. حال می‌توان قطعه‌ی پیش ساخته را با استفاده از جرثقیل یا دستگاه FSM در محل خود قرار داد. شکل (۲-۴) نصب کل دهانه را با استفاده از جرثقیل نشان می‌دهد.

شکل (۲-۴): نصب کل دهانه با استفاده از جرثقیل

۱-۱- ۱ نصب با استفاده از دستگاه FSM

پس از اینکه قطعه پیش‌ساخته به وسیله جرثقیل روی یک دستگاه تریلی چند محوره قرار گرفت، تریلی چند محوره قطعه را به روی دهانه نصب شده قبلی و ابتدای دستگاه FSM حمل می‌نمایدکه در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

شکل (۲-۵): قرارگیری قطعه پیش ساخته روی دستگاه FSM

یک انتهای قطعه پیش‌ساخته به وسیله جرثقیل متحرک جلویی دستگاه FSM از روی تریلی بلند شده و به سمت انتهای دهانه کشیده می‌شود. انتهای دیگر قطعه روی تریلی می‌لغزد و با رسیدن به ابتدای دهانه به وسیله جرثقیل عقبی دستگاه از روی تریلی بلند می‌شود و قطعه پیش‌ساخته به صورت معلق با کمی حرکت، به محل نصب رسیده و به آرامی روی تکیه‌گاه‌ها قرار داده می‌شود، که درشکل (۲-۶) نشان داده شده است.

شکل (۲-۶): قرارگیری روسازه در محل نصب

اکنون دستگاه FSM آماده حرکت به سمت دهانه بعدی می‌باشد، شکل (۲-۷).

شکل (۲-۷): دستگاه FSM در حال آماده شدن برای حرکت به سمت دهانه بعدی

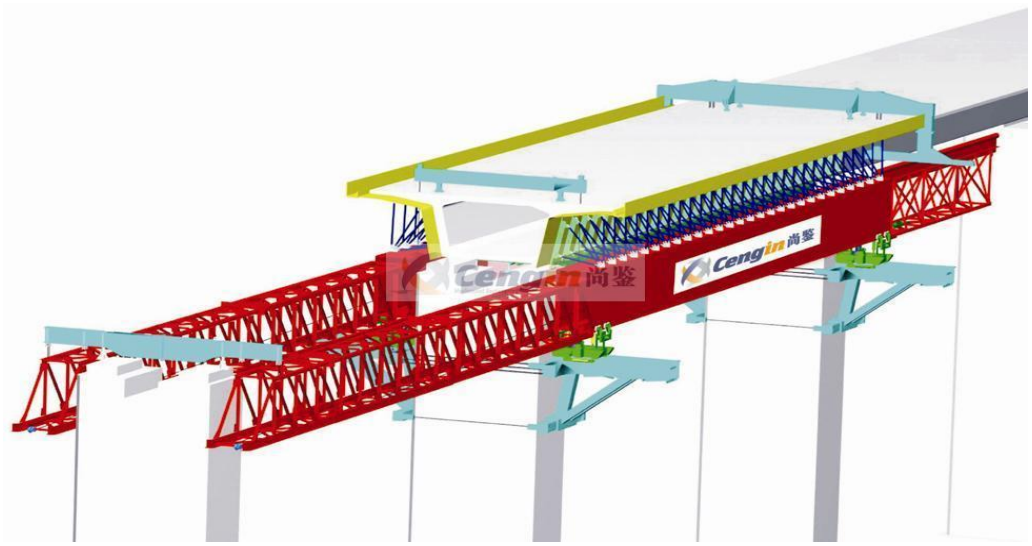
شکل (۲-۸): جاگذاری کل دهانه به روش FSM

درروش FSM قطعه‌های مربوط به دهانه ساخته شده و به وسیله‌ی دستگاه‌های مخصوص در محل خود قرار داده می‌شود به طوری که دیگر برخلاف روش MSS نیازی به قالب بندی وجود ندارد و مهم‌ترین حسن این روش سرعت اجرای بسیار سریع آن و عیب این روش تجهیزات و دستگاه‌های بسیار گران قیمت مورد نیاز می‌باشد.

شکل (۲-۹): جاگذاری عرشه صندوقه‌ای با روشFSM

۲-۱ روش داربست قابل حرکت (Moveable Scaffolding Method)

در روش‌های بالا نحوه‌ی نصب شاهتیرهای صندوقه‌ایِ پیش ساخته، با روش دهانه - به - دهانه توضیح داده شد. حال در اینجا نحوه‌ی اجرای شاهتیرهای صندوقه‌ای به صورت قالب درجا، با روش دهانه- به- دهانه، توضیح داده می‌شود. برای این منظور از سیستم داربست متحرک (MSS-Movable Scaffolding System) استفاده می‌شود.



شکل (۲-۱۰): سیستم داربست متحرک

در این روش عرشه پل به صورت درجا و در محل خود بتن ریزی می شود که لازمه‌ی آن نصب یک سیستم قالب بندی لغزان و با قابلیت حرکت است که بتواند بدون اینکه از عرشه ساخته شده جدا شود در امتداد طول پل حرکت کرده و درقسمت بعدی دوباره با بتن ریزی درجا، ساخت عرشه ادامه پیدا کند. بدیهی است که این سیستم قالب‌بندی به عنوان یک سازه مجزا باید طراحی شود و این سیستم نیز مشابه روش قبل بر روی پایه‌های موجود در هر دهانه تکیه می‌کند. که جزئیات کامل آن درشکل‌های (۲-۱۰) و (۲-۱۱) مشهود است:

شکل (۲-۱۰): جزئیات سیستم داربست متحرک

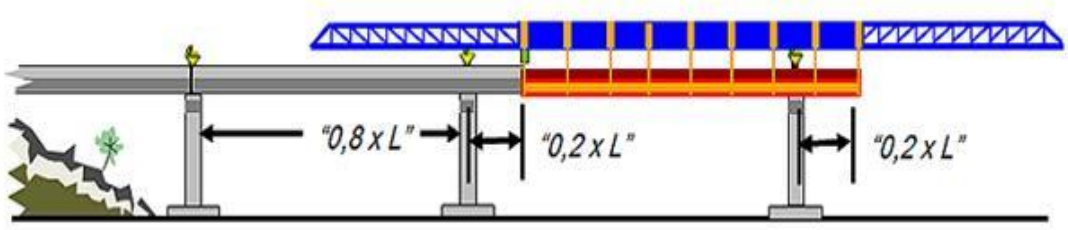
شکل (۲-۱۱): جزئیات سیستم داربست متحرک

MSS برای اجراء عرشه‌ی پل‌ها به صورت قالب درجا طراحی شده است. MSS بسیار کارآمد، کم وزن، دارای طرحی کاملاً کاربردی و نصبی آسان می‌باشد، که به وسیله سیستم‌های هیدرولیکی کاملاً معمولی، روی دستگاه پشتیبانی شده و حرکت می‌نماید.

شکل (۲-۱۲): سیستم داربست متحرک MSS

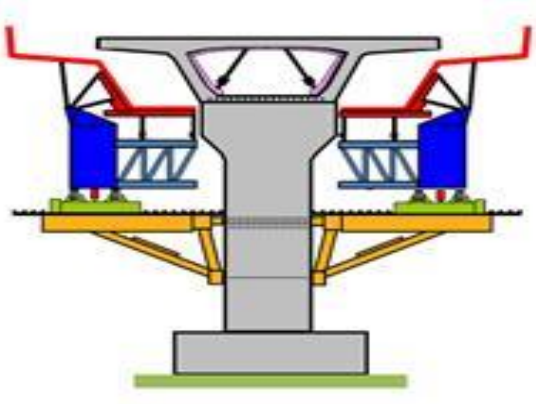
این سیستم به آسانی با هر مقطع عرضی پل (تک صندوقه‌ای، دو صندوقه‌ای، TT و هر شکل دهانه‌ای) می تواند وفق داده شود. این انعطاف پذیری پیمانکار را قادر می‌سازد که این تجهیزات را در پروژه‌های مختلف مجدداً استفاده نماید.

در روش سیستم داربست متحرک، طول دهانه اول معمولاً ۰/۸ طول دهانه‌های بعدی می‌باشد و همچنین ۰/۲ طول هر دهانه در اجرای عرشه دهانه قبلی اجرامی‌گردد (شکل(۲-۱۳)).



شکل (۲-۱۳): اجرای روسازه به وسیله سیستم داربست متحرک

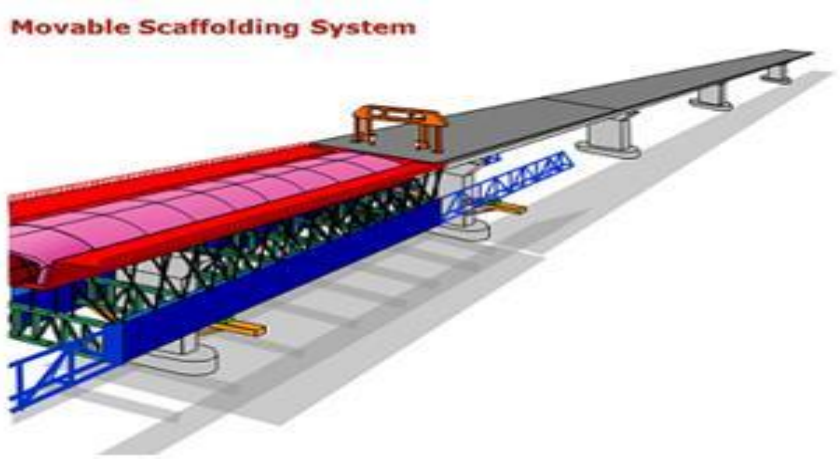
مراحل اجرا در روش سیستم داربست متحرک بدین شرح است که: بعد از بتن ریزی، عملیات کشش کابل‌های پس کشیده که طول آنها برابر با طول کل قالب (یک دهانه) می‌باشد، انجام می‌گردد. سپس شاهتیرهای اصلی به وسیله جک‌های ابتدا و انتها پایین آورده شده، در نتیجه کل قالب که روی تیرها نصب می‌باشند، از عرشه فاصله می گیرند. تیرهای عرضی زیر عرشه که به شاهتیرهای اصلی متصل می‌باشند از وسط جدا شده و شاهتیرها به طور عرضی از ستون‌ها فاصله می‌گیرند تا در زمان حرکت رو به جلو تیرهای عرضی به ستون بعدی برخورد نکنند (شکل (۲-۱۴) و (۲-۱۵)).



شکل (۲-۱۴): جداسازی قالب‌های لغزنده بعد از نصب شاهتیر

شکل (۲-۱۵): حرکت رو به جلو تیر های عرضی

حال MSS آماده حرکت رو به جلو به سمت دهانه بعدی جهت بتن‌ریزی دهانه بعد می‌باشد. پس از رسیدن MSS به دهانه بعد، دو عدد شاهتیر به صورت عرضی به یکدیگر نزدیک شده تا اینکه تیرهای عرضی مابین آنها مجدداً مونتاژ گردد. شاهتیرها به وسیله جک‌ها به سمت بالا رفته تا قالب در موقعیت بتن‌ریزی قرار گیرد. پس از آرماتوربندی و نصب کابل‌های پس‌کشیدگی در دال پایین و دیوارها، قالب داخلی از دهانه قبل حرکت می‌نماید و در موقعیت جدید رگلاژ می‌شود تا آرماتوربندی دال بالاتر صورت گرفته و عرشه آماده بتن ریزی می‌گردد (شکل (۲-۱۶)).



شکل (۲-۱۶): بتن ریزی عرشه بعد از رگلاژ قالب‌ها

این سیستم برای پل‌های روی رودخانه‌ها، پل‌های با پایه‌های بلند و جاهایی که دستیابی به جرثقیل سخت یا غیر ممکن است، بسیار مناسب می‌باشد. سرعت بالای MSS در نصب و حرکت، باعث کاهش فوق العاده زمان اجرا و هزینه‌ها می‌شود. معمولاً برای دهانه‌های بین ۴۰ تا ۶۰ متر و عرض عرشه‌های تا ۲۰ متر از این سیستم استفاده می‌گردد که در هر حرکت، یک دهانه به طور کامل اجرا شده و زمان طی شده جهت اجرای هر دهانه به طور متوسط یک هفته الی ۱۰ روز می‌باشد.

۱-۳ روش کشیدن به پهلو (لغزش به پهلو) (Side Slewing Method)

یک روش ساخت روسازه‌ی پل‌ها (superstructure) این است که شاهتیرهای اصلی پل را (چه شاهتیرهای فولادی و چه شاهتیرهای بتنی پیش ساخته) روی تکیه‌گاه‌های موقتی که در کنار پایه‌ها، روبروی دهانه ایجاد می کنند، کار می‌گذارند و پس از آماده شدن محل شاهتیرها در روی پایه‌ها، شاهتیرها را روی محل‌شان می‌کشند.

برای اینکه حمل شاهتیرها آسان باشد، به عبارتی شاهتیرها در موقع حمل سنگین نباشند تمام یا قسمتی از عرشه را بعد از اینکه شاهتیرها در محل خودشان با مهاربندی کافی نصب شدند، به سیستم روسازه اضافه می‌کنند. این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نصب شاهتیرها همزمان با ساخت پایه‌ها باشد، تا از اتلاف وقت اجتناب شود.

در پل‌های موجود که در آنها به علت کهنگی روسازه، می‌خواهند روسازه‌ی قدیم را با یک روسازه‌ی جدید و قوی‌تر تعویض کنند، این روش یکی از محبوب‌ترین روش‌ها است.

نحوه‌ی اجرای این روش برای پل‌های جدید و پل‌های قدیم یکسان است؛ فقط تفاوت‌شان در اجرا، در یک مورد است؛ در پل‌های جدید که هدف، ساخت پل جدید است، داربست‌ها و سکوی کاری که برای نصب شاهتیرها در کنار پایه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، فقط در یک طرف پایه اجرا می‌شود. در حالی که در پل‌های قدیم که هدف تعویض روسازه‌ی قدیم با روسازه‌ی جدید است، از داربست‌ها و سکوی کار، در دو طرف پایه‌ها استفاده می‌شود؛ که از داربست یک طرف برای برچیدن و گرفتن شاهتیرهای قدیمی استفاده می‌شود و از داربست طرف دیگر برای نصب شاهتیرهای جدید به طور همزمان استفاده می‌شود.

۱-۴ روش استفاده از خرپای موقت

در روش چهارم از سری روش‌های اجرای دهانه - به- دهانه، از یک خرپای فولادی موقت برای نصب در دهانه‌ی بین دو پایه اصلی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا قطعات صندوقه‌ای یا U شکل در داخل سایت به صورت پیش‌ساخته آرماتوربندی، غلاف گذاری، نصب شیپوری‌های چدنی (Anchor Plate) در قطعات ابتدایی و انتهایی هر دهانه، قالب بندی و در نهایت بتن‌ریزی می‌شوند. قطعات پیش‌ساخته به تعداد پوشش یک دهانه کامل روی

تریلی های چندمحوره به زیر دهانه یا روی دهانه نصب شده قبلی، حمل می‌گردند. خرپای نصب، تکیه‌گاه‌های موقتی را برای قطعات منفرد فراهم می‌نماید تا زمانیکه آنها در محل نهایی خود نصب و پس‌کشیده شوند. هنگامی که یک دهانه کامل شد، خرپای نصب برداشته می‌شود و مجدداً در دهانه‌ی مجاور قرار می‌گیرد. این فرآیند تا تکمیل کلیه‌ی دهانه‌ها ادامه می‌یابد که در شکل (۲-۱۷) نشان داده شده است.

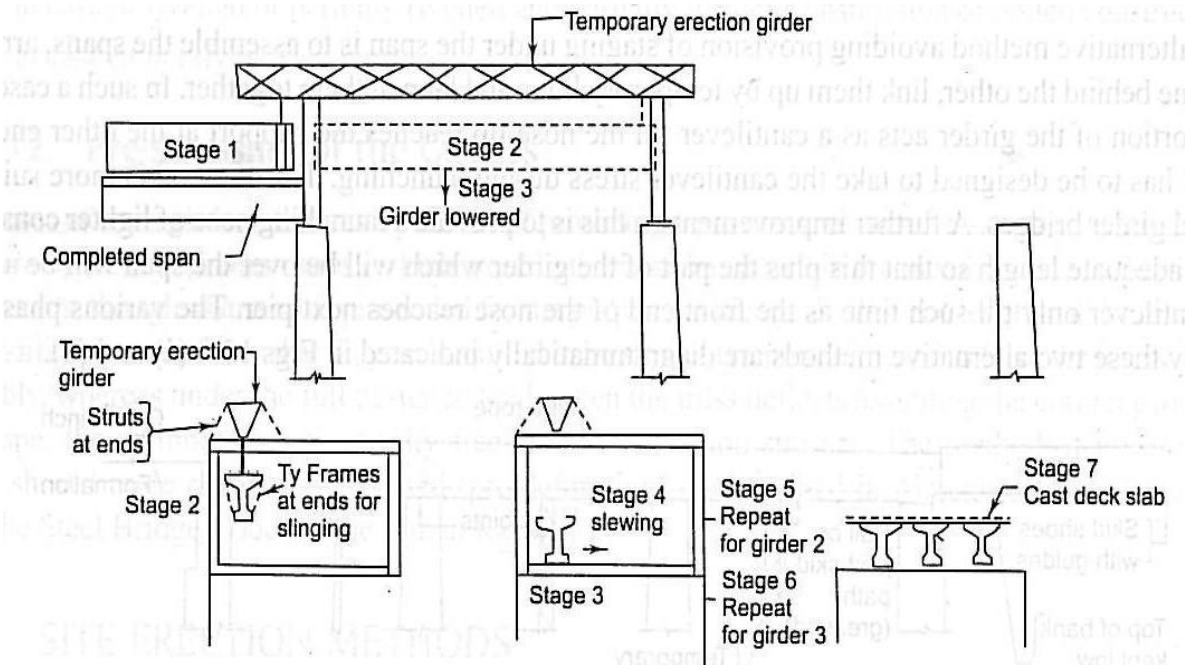
در حین نصب اولیه‌ی قطعات، از ماده‌ی اپوکسی در محل درزهای قطعات پیش ساخته استفاده می‌شود. چسب اپوکسی بند مابین قطعات را آب‌بندی می‌کند و از نشت دوغاب سیمان تزریقی داخل غلاف‌ها در پایان پروژه جلوگیری می‌نماید.

شکل (۲-۱۷): گذاشتن قطعات پیش ساخته روی خرپای موقت

در روش‌های بالا در باره‌ی نحوه‌ی نصب شاهتیرهای صندوقه‌ای، چه در حالت پیش‌ساخته و چه در حالت قالب درجا، با استفاده از روش دهانه - به - دهانه توضیح داده شد. حال در اینجا درباره‌ی نحوه‌ی نصب تیرهای I شکل و T شکل- حبابی پیش‌تنیده، با استفاده از روش دهانه - به - دهانه مختصری توضیح داده می‌شود.

روش اتخاذ شده برای نصب شاهتیرهای I شکل و T شکل- حبابی پیش تنیده، چنین است که ابتدا یک تکیه‌گاه قابی یا تیری موقت از جنس فولاد یا آلومینیوم را بالای دهانه نصب می‌کنند که این تکیه‌گاه تیری، تیر نصب نام دارد. سپس شاهتیر اصلی را روی تکیه‌گاه قابی یا تیری ایجاد شده در بالای دهانه می‌کشند. هنگامی که

تمام طول شاهتیر اصلی در بالای دهانه قرار گرفت، آن را توسط جک به پایین آورده و در موقعیت خودش قرار می‌دهند. شاهتیر بعدی، بعد از اجرا و آماده شدن روی خاکریز دسترسی به صورت طولی روی تیر نصب قرار گرفته و بقیه‌ی رَوَند تا زمانی که تمام شاهتیرهای اصلی در موقعیت خود قرار گیرند، تکرار می‌شود. تیر نصب یا تکیه‌گاه قابی می‌تواند بعد از اتمام یک دهانه جابجا شده و بالای دهانه‌ی بعدی قرار گیرد. شاهتیرهای دهانه‌ی بعدی هم می‌توانند به صورت طولی روی دهانه‌ی قبلی که اجرای آن تمام شده قرار گیرند. رَوَند انجام عملیات با استفاده از این روش، به صورت شماتیک در شکل (۲-۱۸) نشان داده شده است.

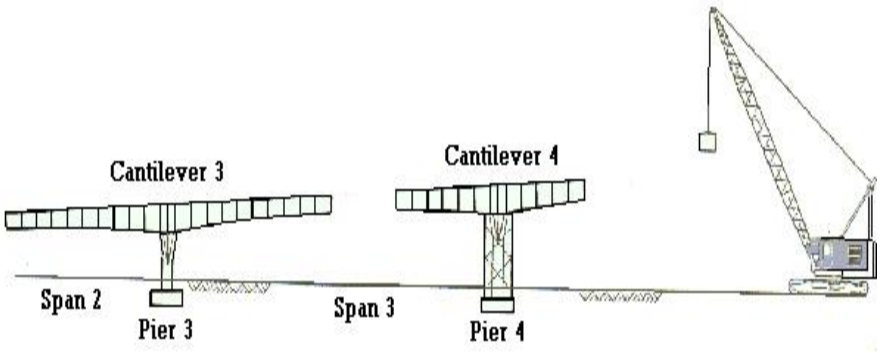


شکل (۲-۱۸): مراحل نصب شاهتیرها با استفاده از شاهتیر نصب

۲- اجرا به روش طره‌ای متعادل (Balanced Cantilever Method)

این شیوه‌ی ساخت، برای هر دو نوع اجرای درجا و پیش‌ساخته مناسب است. درحالت پیش‌ساخته، قطعات منفردِ شاهتیر به طور متقارن نسبت به یک پایه نصب می‌شوند. همانطور که قطعات شاهتیر به تدریج در طرفین پایه نصب می‌شوند، لنگرهای خمشی طره که به طرفین پایه اعمال می‌شود، یکدیگر را در طرفین پایه متعادل می‌کنند. زمانیکه طره به وسط دهانه رسید، قطعه‌ی نهایی (قطعه‌ی تمام کننده)، در فاصله‌ی بین دهانه‌ی نصب

شده در طرفین پایه‌های مجاور متصل می‌شود. این فرآیند تا تکمیل کلیه‌ی دهانه‌های پل ادامه می‌یابد (شکل‌های (۲-۱۹) تا (۲-۲۰)).

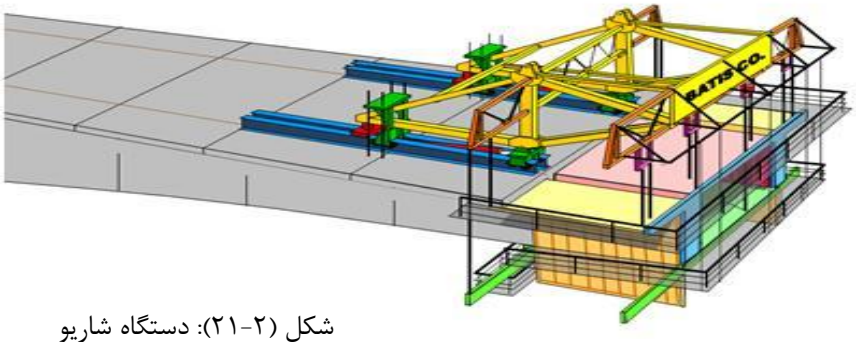


شکل (۲-۱۹): مراحل نصب شاهتیرها با استفاده از روش طره‌ای متعادل

شکل (۲-۲۰): جاگذاری قطعات عرشه صندوقه‌ای با استفاده از جراثقال

در حالت بتن درجا، برای اجرا از دستگاه شاریو استفاده می‌شود .

دستگاه شاریو پیش رونده در سال ۱۹۷۰ ساخته شده و امروز از آن به عنوان کاهش دهنده هزینه اجرای پل در سراسر پروژه‌های دنیا یاد می‌شود. این سیستم سبک، تطبیق‌پذیر و آسان برای نصب و اجرا می‌باشد. حرکت رو به جلو و عقب روی ریل‌ها، دستگاه را جهت راه اندازی و حرکت به طور آسان و با سرعت، توانمند ساخته است.



شکل (۲-۲۱): دستگاه شاریو

دستگاه شاریو استاندارد به طور معمول برای قطعات به طول تا ۵ متر و ظرفیت باربری (وزن بتن و قالب) متغیر از ۱۰۰ تا ۶۰۰ تن طراحی می‌شود. وزن فولاد به کار رفته در آن به مقطع عرضی پل مورد نظر وابسته است، اما به طور معمول از حدود ۲۵ تن تا ۱۱۰ تن در هر دو طرف متغیر می‌باشد. دستگاه شاریو تقریباً برای هر قطعه با هر مقطع می‌تواند وفق داده شود و در طی اجرا برای تغییرات در طول قطعه (تا ۵ متر)، ارتفاع مقطع، ضخامت جان و عرض عرشه به آسانی قابل تنظیم است. به وسیله دستگاه شاریو پل‌هایی با دهانه‌های بزرگ (۸۰ متر، ۱۰۰ متر، ۱۴۰ متر و ...) در مناطق کوهستانی که دارای دره‌های عمیق می‌باشند یا روی رودخانه‌های خروشان و پر آب اجرا می‌گردد، که بسیاری از آنها نیز در ایران احداث گردیده است (شکل‌های (۲-۲۲) و (۲-۲۳)).

شکل (۲-۲۲): اجرای روسازه با استفاده از دستگاه شاریو

شکل (۲-۲۳): اجرای روسازه با استفاده از دستگاه شاریو و عبور ارز رودخانه

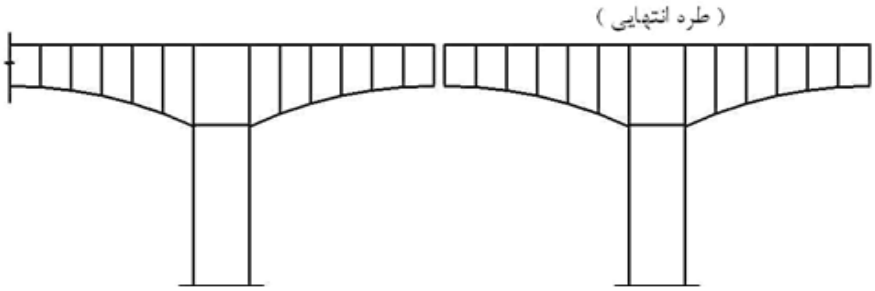
مراحل اجرا به وسیله شاریو بدین شرح است که: ابتدا قطعه اول با مقطع صندوقه‌ای روی سر ستون به صورت درجا ساخته می‌شود. ریل‌های شاریو روی قطعه اول پرس می‌گردد و دستگاه روی ریل‌ها مونتاژ می‌شود. دستگاه مونتاژ شده روی قطعه اول، قالب را جهت اجرای قطعه بعدی نگه می‌دارد که قطعه دوم، دو لنگه بوده و به دو انتهای صندوقه اول می‌چسبد. شاریو با حرکت به سمت دهانه‌های میانی و کناری روی ریل‌هایش، قالب را برای اجرای کلیه قطعات حمل می‌نماید. هر قطعه پس از آرماتور بندی و نصب مصالح تنیدگی و بتن‌ریزی به وسیله کشش کابل‌های پیش‌تنیدگی به قطعه قبل خود و در واقع به تمامی قطعات قبلی پرس می‌گردد و تکیه‌گاهی استوار برای ریل‌ها، شاریو و جابجایی بعدی به سمت پایان پروژه می‌باشد (شکل‌های (۲-۲۴) تا (۲-۲۶)).

شکل (۲-۲۴): جاگذاری دستگاه شاریو روی قطعه اول

شکل (۲-۲۵): آماده سازی روسازه برای بتن‌ریزی روی دستگاه شاریو

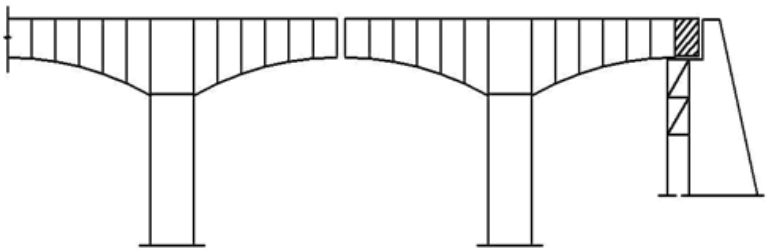
شکل(۲-۲۶): اجرای روسازه با استفاده از دستگاه شاریو

برای پایه‌های مجاور به نشستگاه‌ها، روش کار اندکی متفاوت می‌باشد. در این حالت، ابتدا طره انتهایی تکمیل می‌گردد.



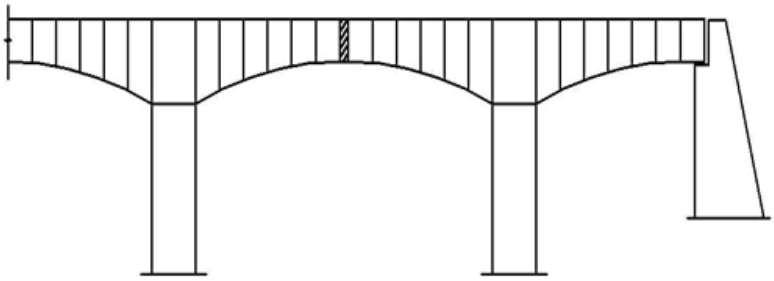
شکل (۲-۲۷): تکمیل طره انتهایی در روش طره‌ای متعادل

پس از آن نشستگاه تکمیل شده و با کمک بتن درجا بین طره انتهایی و نشستگاه، پیوستگی ایجاد می‌گردد.



شکل (۲-۲۸): تکمیل نشستگاه و اتصال دادن آن به طره انتهایی به کمک بتن‌ریزی درجا

در مرحله‌ی آخر مطابق روال معمول دهانه مجاور به طره انتهایی با بتن درجا یکسره خواهد شد.



شکل (۲-۲۹): اجرای دهانه میانی

در روش طره‌ای متعادل می‌توان از قطعات درجا و یا پیش‌ساخته استفاده نمود. روش طره‌ای متعادل برای عبور از مناطقی که در آنها امکان قالب‌بندی و شمعک گذاری وجود ندارد نظیر دره‌های عمیق، آبراه‌ها و یا در عبور از جاده‌های پرتردد، بسیار مناسب می‌باشد.

۳- اجرا به روش پیشرانی (هل دادن رو به جلو) (Incremental Launching Method)

این روش اساساً یک روش طره‌ای می‌باشد. در سال‌هایی که این روش هنوز ابداع نشده بود، در هر پروژه‌ی بزرگ پل‌سازی، هزینه‌ای که صرف کارگران می‌شد، بیشترین سهم از هزینه‌ی پل سازی را به خود اختصاص می‌داد. بنابراین هر نوآوری و ابداعی که می‌توانست نظارت کارگران بر پروژه را کاهش دهد و در مقابل سهم تجهیزات کارگاهی و ماشین‌آلات را در اداره‌ی پروژه افزایش دهد، یک راه بسیار تأثیر گذار دراقتصاد پروژه می‌بود. یک بخش از این راه، می‌توانست این باشد که قطعات پس از تولید در کارخانه، سریعاً اجرا شوند. از این رو طراحان و پیمانکاران پل‌های مختلف، به این جنبه‌ی ساخت پل نیز توجه کردند.

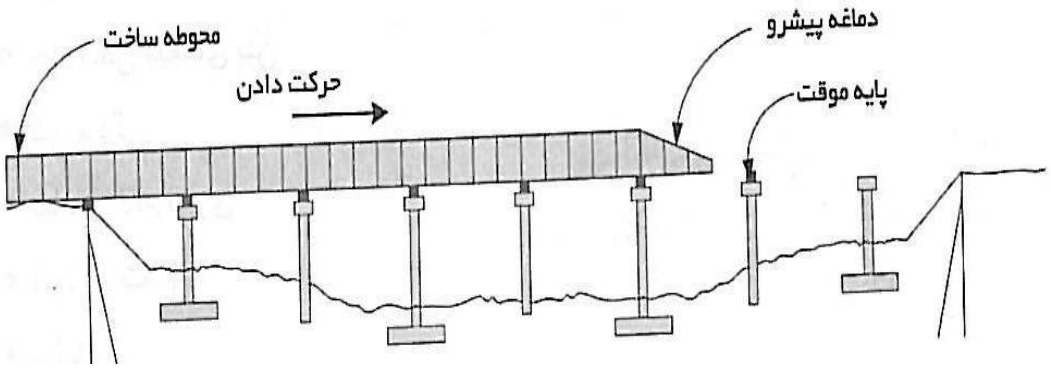
شکل (۲-۳۰): اجرای روسازه پل با استفاده از روش پیشرانی

Dyckerhoff & Widmann و Prof.Leonhardt & W.Raur دو زوج کاری پیشگام در این زمینه بودند؛ که فنون لازم، توسط زوج دوم توسعه داده شد و در ساخت پل چهار دهانه‌ای که از بالای رودخانه‌ی Ager دراسترالیا می‌گذشت، در سال ۶۲- ۱۹۵۹ مورد استفاده قرار گرفت. روشی که برای ساخت این پل مورد استفاده قرار گرفت، امروزه با نام روش پیشرانی (Incremental Launching) شناخته می‌شود.

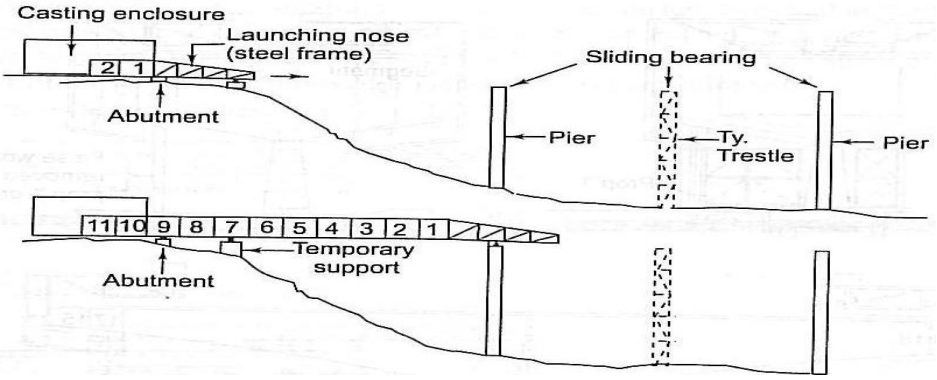
در این روش صندوقه‌ها دارای ارتفاع ثابتی هستند اما ضخامت دال تحتانی صندوقه‌ها را می‌توان متغیر انتخاب نمود تا در نواحی با لنگرمنفی زیاد مقطع دارای کارایی کافی باشد. برای پل Wabash river حداکثر طول دهانه ها به ۵۷ متر می‌رسید که در هنگام اجرا استفاده از پایه های موقت و دماغه جلو برنده دهانه ساخت را به حدود ۱۴ متر تقلیل داد.

روش پیشرانی یک روش مکانیزه (ماشینی) در اجرای عرشه‌ی پل‌ها می‌باشد. از روش پیشرانی می‌توان برای ساخت پل‌های بدون قوس و قوسی در شعاع افقی (پل منحنی) استفاده کرد. طول پل‌های ساخته شده به این روش حدوداً ۱۰۰ الی ۱۲۰۰ متر می‌باشند.

دراین روش در ابتدای کوله روی زمین، یک محوطه سرپوشیده مجهز ساخته می‌شود (همانند یک کارخانه ساخت بتن پیش‌ساخته)، که در این محوطه، قطعات بتنی عرشه‌ی پل، آرماتوربندی، قالب بندی، نصب تجهیزات پیش‌تنیدگی و بتن‌ریزی می‌شوند. در این روش پس از اینکه قطعات به صورت مجزا در پشت کوله ساخته شدند، هر قطعه‌ی جدید مستقیماً پشت قطعه‌ی قبلی بسته می‌شود و سپس پس‌کشیده شده و توسط جک‌های هیدرولیکی رو به جلو هل داده می‌شود. این فرآیند تا زمان تکمیل پل ادامه می‌یابد (شکل‌های (۲-۳۱) و (۲-۳۲)). دراین روش ساخت هر قطعه تا اتمام بتن ریزی و حرکت رو به جلو حدوداً یک هفته زمان می‌برد .



شکل (۲-۳۱): نمایی کلی از ساخت روسازه به روش پیشرانی



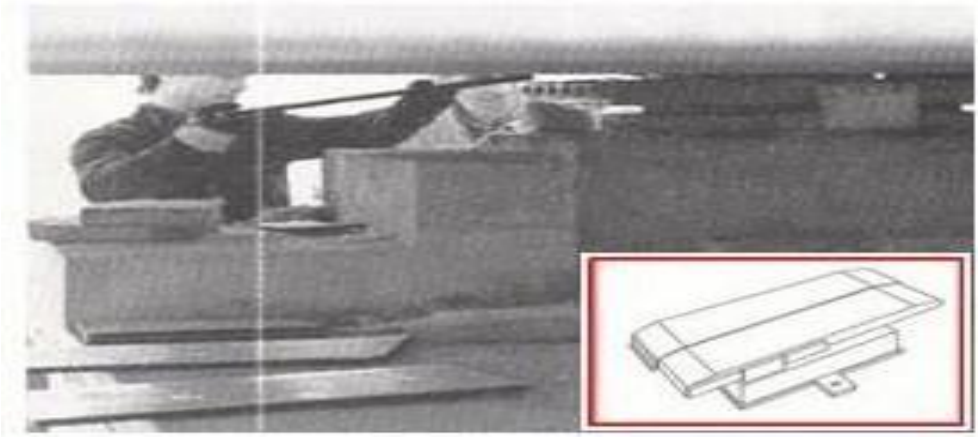
شکل (۲-۳۲): دماغه پیشرو و پایه های موقت در روش پیشرانی

همانطور که درشکل‌های بالا دیده می‌شود قسمت جلوی شاهتیر همانند یک طره عمل می‌کند؛ بنابراین تنش‌ها و لنگرهای خمشی منفی در طول زمان نصب دهانه، در قطعات طره‌ای ایجاد می‌شود. برای کاهش اثرات لنگر خمشی منفی در قطعات طره‌ای از یک دماغه‌ی پیشروی فولادی (Launching nose) که به صورت سبک ساخته شده و دارای طول کافی است (طول آن حدود ۶۰ درصد طول دهانه می‌باشد)، استفاده می‌شود. همچنین در دهانه‌های خیلی بزرگ برای کاهش اثرات لنگر خمشی منفی در قطعات طره‌ای می‌توان از پایه‌های موقت نیز علاوه بر دماغه‌ی پیشرو، استفاده کرد. دماغه‌ی پیشرو و پایه‌های موقت در شکل‌های (۲-۳۱) و (۲-۳۲) نشان داده شده است. دماغه‌ی پیشرو به قسمت جلوی قطعه‌ی جلویی اضافه می‌شود و فقط تا زمانی به صورت طره عمل می‌نماید که قسمت نوک دماغه به پایه‌ی بعدی برسد (شکل (۲-۳۳)).

شکل (۲-۳۳): دماغه پیشرو

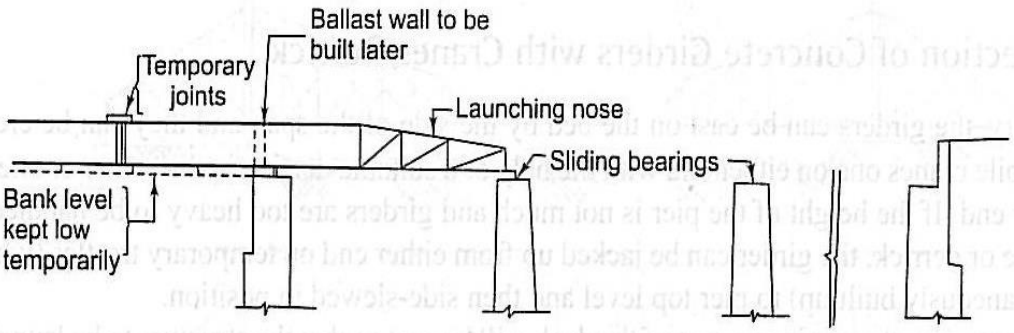
با نصب دماغه‌ی پیشرو از مقدارلنگرهای منفی قسمت طره‌ای کاسته می‌شود؛ چرا که ازیک دماغه‌ی پیشروی فولادی سبک به جای دماغه‌ی بتنی بسیار سنگین شاهتیر استفاده می‌شود.

نکته‌ی دیگری که در اینجا لازم است به آن اشاره کنیم این است که در این روش برای اینکه حرکت قطعات بتنی روی پایه ها راحت باشد، در روی پایه‌ها، تکیه گاه هایی با اصطکاک کم نصب می‌کنند. همچنین در دو طرف پایه، رولیک یا هر وسیله دیگری نصب می‌شود تا در هنگام حرکت رو به جلوی سازه، از خروج عرشه از محور خود جلوگیری به عمل آید (شکل (۲-۳۴)).



شکل (۲-۳۴): استفاده از رولیک برای جلوگیری از خروج از محوریت

از این روش برای نصب شاهتیرهای فولادی نیز استفاده می‌شود (شکل (۲-۳۵)).



شکل (۲-۳۵): نصب شاهتیرهای فولادی با استفاده از روش پیشرانی

امروزه اجرای پل‌ها به وسیله روش پیشرانی تدریجی در حال متداول شدن هستند، دلیل این مهم دقت بالای این روش ساخت پل می‌باشد.

دو روش مختلف پیشرانی وجود دارد: پیشرانی به صورت منفرد و پیشرانی به صورت چندگانه. پیشرانی تدریجی به صورت منفرد به عنوان متداول‌ترین روش پیشرانی روندی است که در آن قطعات در یک ایستگاه ساخته می‌شوند سپس عملیات پیشرانی آغاز می‌شود. در روش پیشرانی چندگانه از ۲ ایستگاه جداگانه بهره‌برداری می‌شود. در روش پیشرانی چندگانه، بیش از یک بخش را همزمان می‌توان ساخت که این کار باعث تسریع عملیات ساخت می‌شود.

از جمله‌ی پروژه‌هایی که در ایران با استفاده از روش پیشرانی (برای نصب شاهتیرهای فولادی) انجام شده است، پروژه‌ی پل ارومیه می‌باشد؛ که شکل‌های مربوط به این پروژه در شکل‌های (۲-۳۶ تا ۲-۴۰) نمایش داده شده است.

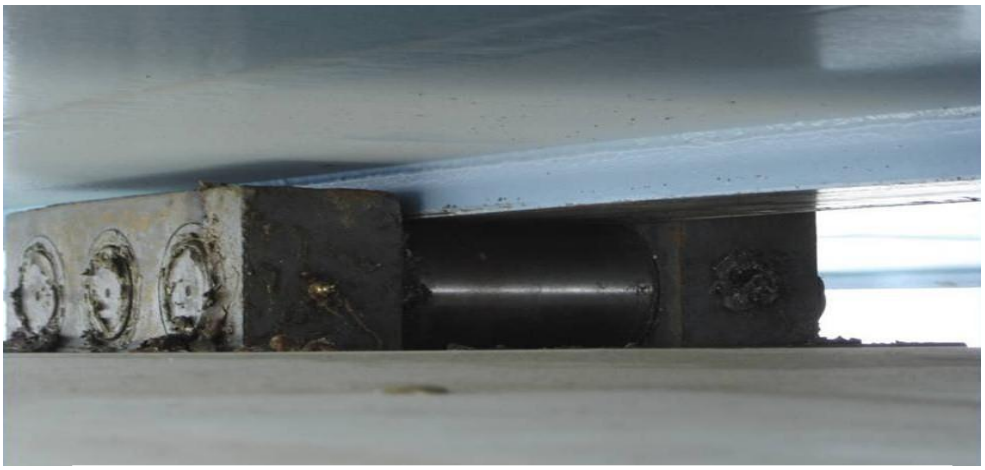
شکل (۲-۳۶): اجرای روسازه پل ارومیه با استفاده از روش پیشرانی

شکل (۲-۳۷): اجرای روسازه پل دریاچه ارومیه با استفاده از روش پیشرانی

شکل (۲-۳۸): دماغه پیشرو - پل دریاچه ارومیه

شکل (۲-۳۹): استفاده از نئوپرن در زیر شاهتیرها دربالای پایه‌ها - پل دریاچه ارومیه

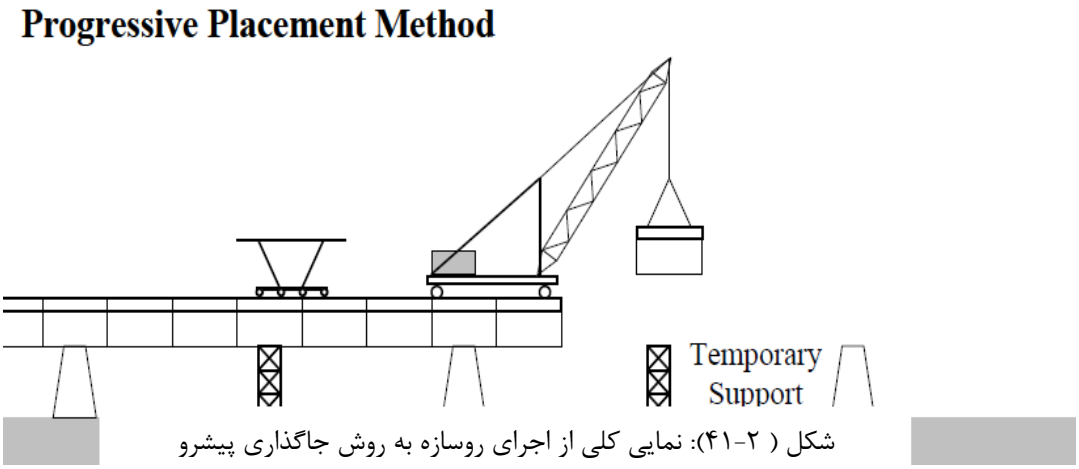
روی سرستون‌ها غلتک قرار داده می‌شود تا شاهتیر فولادی بر روی آن به راحتی حرکت کند.



شکل (۲-۴۰): استفاده از غلتک بر روی سر ستون‌ها- پل دریاچه اورمیه

۴- اجرا به روش جاگذاری پیشرو (Progressive Placement Method)

این روش در مقایسه با روش طره متعادل مطابق شکل پایین یک روش با عملیات ساخت در یک جهت است همه‌ی قطعات کنسولی به ترتیب در نوک قطعه‌های قبلی قرار می‌گیرند.



شکل (۲-۴۱): نمایی کلی از اجرای روسازه به روش جاگذاری پیشرو

هر دوحالت پیش‌ساختگی (precast) و ساخت در محل (cast-in-place) می‌تواند برای قطعات پل استفاده شود. یک روش رایج برای ساخت پل به روش جاگذاری پیشرو استفاده از برج‌های موقت به عنوان تکیه‌گاه برای روسازه می‌باشد. مطابق نظر(1983)Mathivat این روش برای دهانه های ۳۰-۵۰ متر عملکرد مناسبی دارد.

این روش چندین مزیت مهم دارد:

۱) دراین روش برخلاف روش طره‌ای متعادل نیاز به تغییرموقعیت برای ساخت نیست که این، کنترل پروسه ساخت و ساز را آسان می‌کند.

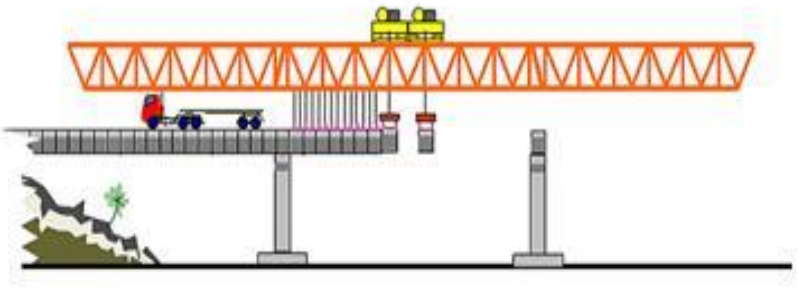
۲) این روش برای اجرای انحناهای افقی مناسب است.

۳) از نقطه نظر طراحی دراین روش در مقایسه با روش پیشرانی و طره‌ای متعادل جریان نیروها بین روسازه و پایه‌ها نسبتا ساده‌تر است.

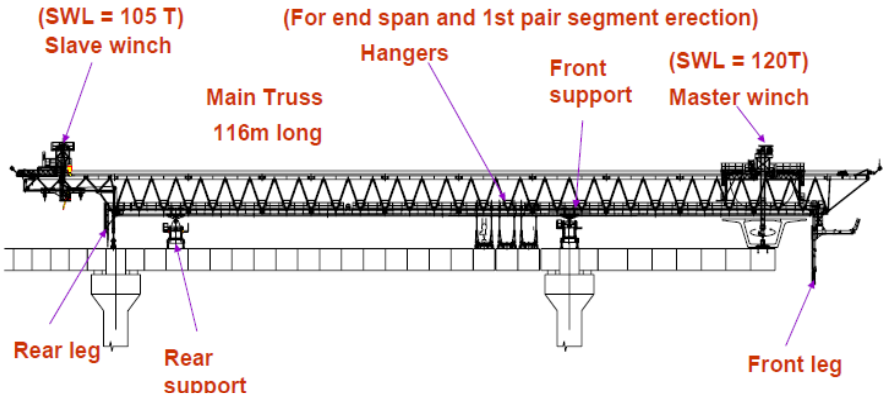
این روش، بسیار شبیه به روش اجرای دهانه- به- دهانه که در بالا اشاره شد، می‌باشد. اجرای یک دهانه از یک پایه شروع و به سمت پایه‌ی مجاور پیش می‌رود و این فرآیند به ترتیب برای تمام دهانه‌ها تکرار شده تا زمانی که پل تکمیل گردد.

از جمله زیر مجموعه‌های این روش، می‌توان به روش نصب با استفاده از دستگاه LG (Luanching Gantries) اشاره کرد. دستگاه LG (Launching Gantries) جهت نصب صندوقه‌های پیش‌ساخته برای پل‌های با دهانه‌های تا ۷۵ متر در شعاع کاملاً افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

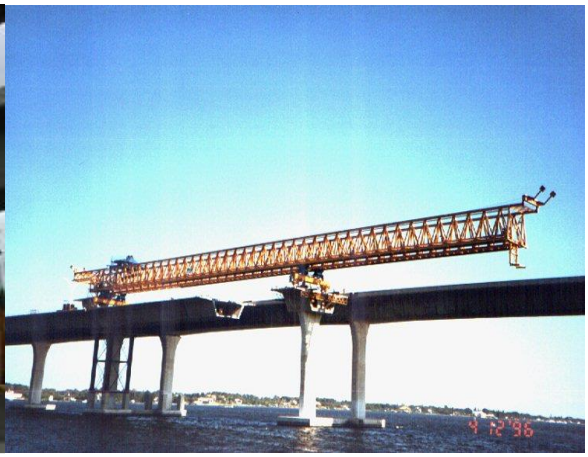
در این روش ابتدا قطعات صندوقه‌ای یا U شکل در داخل سایت به صورت پیش‌ساخته آرماتوربندی، غلاف گذاری، نصب شیپوری‌های چدنی (Anchor Plate) در قطعات ابتدایی و انتهایی هر دهانه، قالب بندی و در نهایت بتن ریزی می‌شوند. سپس قطعات پیش ساخته به تعداد پوشش یک دهانه کامل روی تریلی‌های چند محوره به زیر دهانه یا روی دهانه نصب شده قبلی، حمل می‌گردند. دستگاه LG دارای یک جرثقیل خاص می‌باشد که روی خرپاهای اصلی نصب شده است. به وسیله این جرثقیل قطعات یکی پس از دیگری از روی تریلی بلند شده و به موقعیت خود حمل می‌گردند که در آنجا به وسیله میلگردهایی که به خرپا متصل هستند، آویخته می‌شوند (شکل-های(۲-۴۲)تا (۲-۴۶)).



شکل (۲-۴۲): اجرای روسازه به روش جاگذاری پیشرو



شکل (۲-۴۳): اجزای دستگاه LG



شکل (۲-۴۴): نصب روسازه با استفاده از دستگاهLG

شکل (۲-۴۵): نصب روسازه با استفاده از

شکل (۲-۴۶) اجرای روسازه دارای قوس افقی

هر قطعه پیش ساخته جدید که در محل خود آویزان می‌گردد، به وسیله میلگردهای کششی به قطعه قبلی نصب شده و با یک نیروی حداقل پرس می‌گردد تا یک تماس فشاری حداقل بین قطعات حاصل شود. همزمان با این عمل، بند مابین قطعات به وسیله چسب اپوکسی (epoxy) آبندی می‌گردد. این چسب از نشت دوغاب سیمان تزریقی داخل غلاف‌ها در پایان پروژه جلوگیری می‌نماید. پس از نصب آخرین قطعه و پوشش یک دهانه کامل، کابل‌های پیش‌تنیدگی به داخل غلاف‌های سرتاسری درون قطعات پیش‌ساخته که در امتداد یکدیگر نصب شده بودند، انداخته می‌شوند و سپس متعلقات گیره‌ها در دو انتهای دهانه (روی قطعات ابتدایی و انتهایی) نصب می‌گردند و عملیات کشش کابل‌ها به وسیله جک‌های مولتی‌استرند صورت می‌پذیرد و قطعات با نیروی نهایی به یکدیگر پرس شده و آماده بارگذاری می‌گردند (شکل (۲-۴۷)).

شکل (۲-۴۷) کشش کابل ها توسط جک‌های چند رشته‌ای

در مرحله پایانی کابل‌های باقیمانده از انتهای گیره‌ها بریده شده و عملیات تزریق دوغاب سیمان به داخل غلاف‌ها انجام می‌گردد. حال دستگاه LG آماده حرکت به سوی دهانه بعدی و ادامه پروژه می‌باشد (شکل (۲-۴۸)).

شکل (۲-۴۸) دستگاه LG درحال حرکت به سمت دهانه بعدی

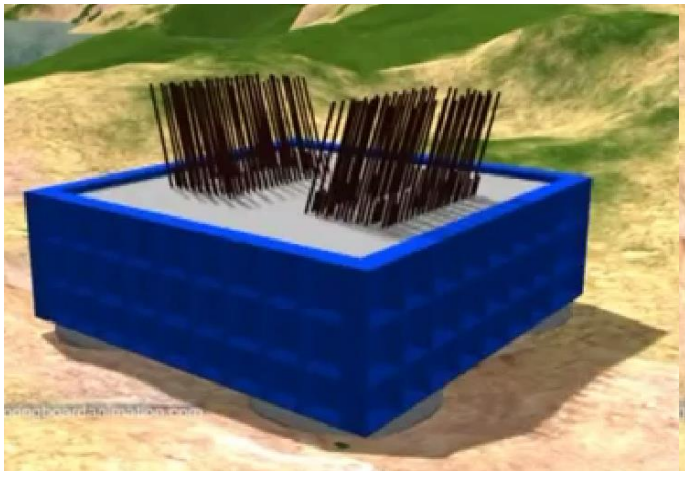
۵- ساخت پل‌های کابلی

۵-۱ ساخت پل‌های ترکه‌ای

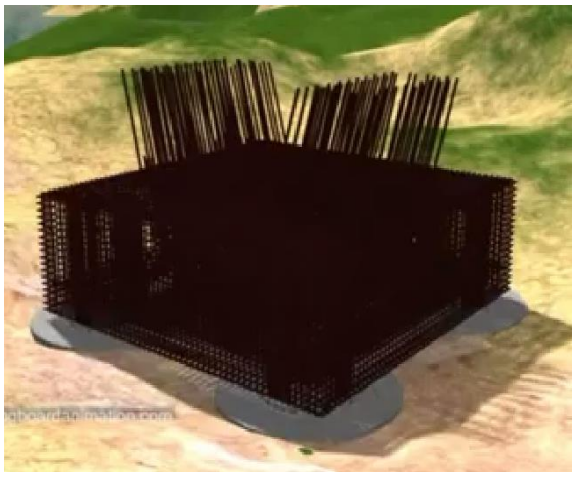
مراحل اجراء پل‌های ترکه‌ای را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد:

۱- پی‌های پل بصورت شمع اجرا شده سپس پایه روی آن آرماتور بندی ، قالب‌گذاری و بتن‌ریزی می‌شود (شکل‌های (۲-۴۹) تا (۲-۵۱)).

شکل (۲-۴۹): پی‌های ساخته شده از شمع

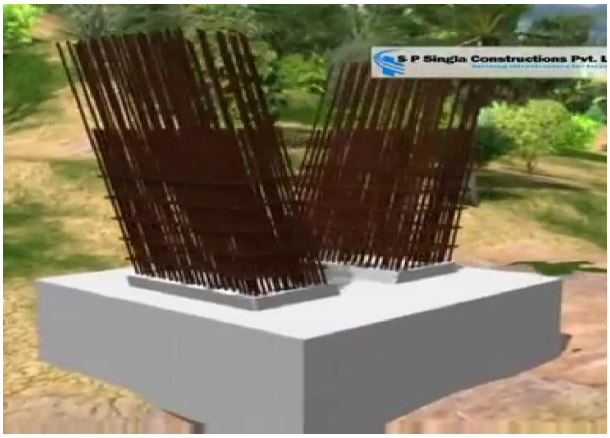


شکل (۲-۵۰): آرماتوربندی پایه‌ها



شکل (۲-۵۱): قالب بندی و بتن‌ریزی پایه‌ها

۲- آرماتوربندی و قالب بندی برج‌ها- قالب‌ها معمولاًاز نوع پیش رونده هستند (شکل‌های (۲-۵۲) و (۲-۵۳).

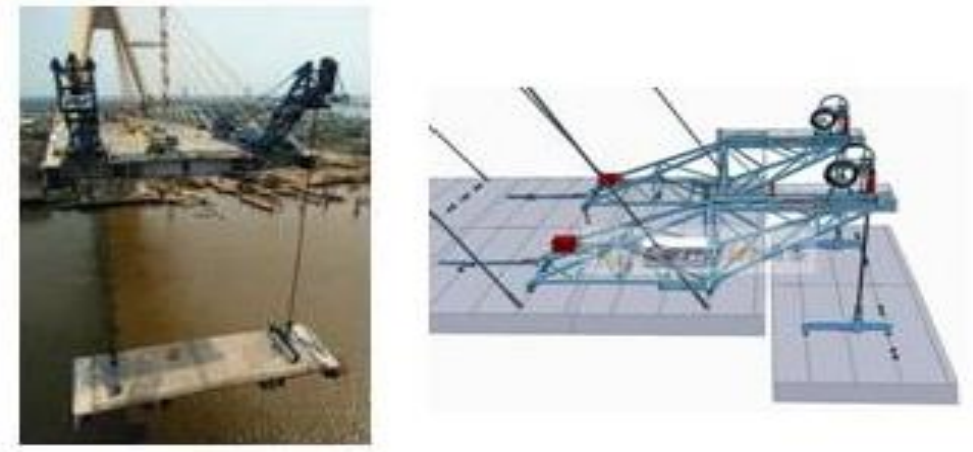


شکل (۲-۵۲): آرماتوربندی برج‌ها

۲- اجرای برج‌ها

شکل (۲-۵۳) استفاده از قالب پیش رونده

۳- اجرای عرشه: پل‌های ترکه‌ای عموماً با قالب لغزنده در عرشه (شاریو) به صورت پیش رونده از دو طرف اجرا می‌گردند. در این روش اخرین قطعه، قطعه وسط خواهد بود. این مرحله شامل اجرای کابل‌ها نیز می‌باشد.



شکل (۲-۵۴) استفاده از قالب لغزنده برای ساخت عرشه

شکل (۲-۵۵): ساخت عرشه به صورت طره‌ای از دو طرف پایه‌ها

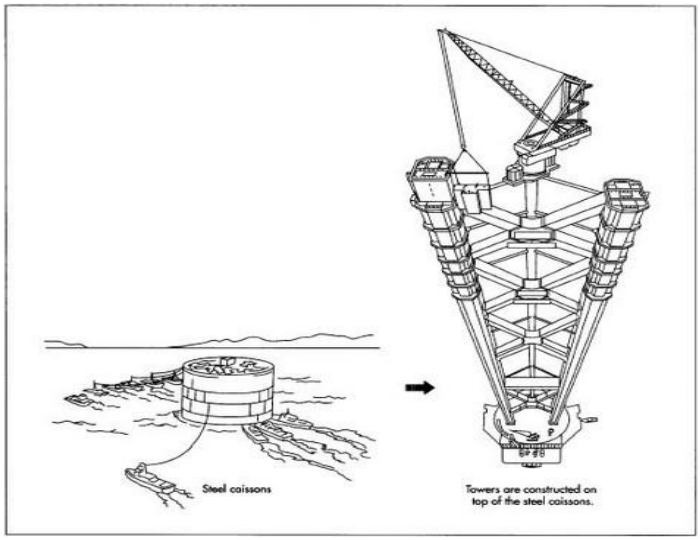
۵-۲ ساخت و ساز پل‌های معلق

ساخت و ساز پل‌های معلق شامل ساخت متوالی سه بخش عمده که شامل ساخت برج‌های اصلی، لنگرگاه‌ها و روسازه می‌باشد.

۵-۲-۱ ساخت برج‌های اصلی

در پل‌های معلق برج‌های اصلی به عنوان تکیه‌گاه کابل‌های اصلی و سازه های معلق هستند. کنترل درستی جهت شفت‌های برج اصلی برای اینکه ستون وار (عمودی وار) بیاستند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در طول مدت ساخت از آنجایی که برج‌ها به صورت کنسولی هستند به راحتی در اثر باد دچار ارتعاش می‌شوند بنابراین

اقدامات لازم برای جلوگیری از این کار باید انجام شود. برای آماده سازی ساخت فونداسیون برج‌ها، زمین را تا رسیدن به سنگ سخت می‌کَنَند. بعضی از پل‌ها طوری طراحی شده‌اند که برج‌های آنها در خشکی ساخته می‌شود و کار ساخت را آسان می‌کند. اگر برج در داخل آب واقع شود، ساخت و ساز آن با فرو بردن یک صندوقچه (استوانه فولادی و بتنی که در حقیقت مانند سد دایره‌ای است) به زیر آب شروع می‌شود. آب داخل صندوقچه را خالی می‌کنند که به کارگران اجازه کَندن فونداسیون در محل بدون آب را می‌دهد. زمانی که حفاری کامل شد فونداسیون برج بتنی ایجاد می‌شود و بتن ریزی آن انجام می‌شود.



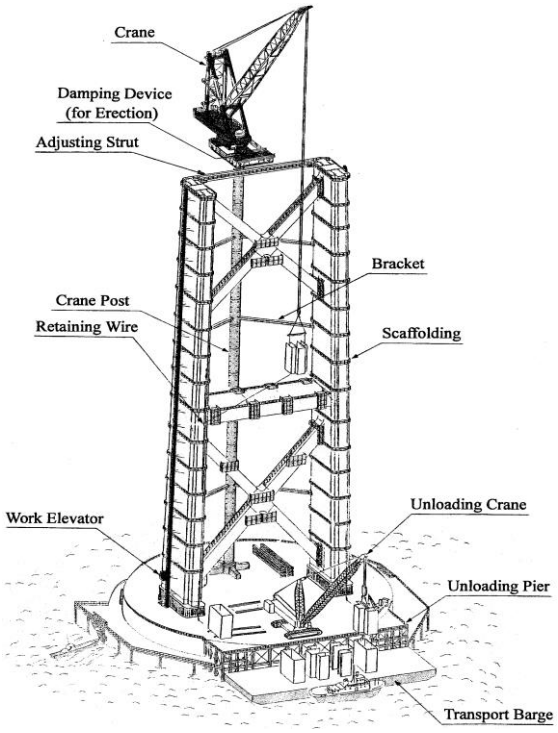
شکل (۲-۵۶): ساخت شالوده برج‌های اصلی پل معلق آکاشی‌کایکو در داخل آب

جزئیات ساخت هر پل منحصر به فرد و متفاوت است. نمونه‌های اخیر از ساخت برج فولادی پل اکاشی‌کایو و برج بتنی پل تسینگ‌ما در زیر شرح داده شده است.

۵-۲-۱-۱ برج‌های فولادی [۲]

برج‌های فولادی به طور معمول از سلول‌هایی یا مقاطع جعبه‌ای با دنده‌های سخت‌کننده صفحه‌ای تشکیل شده است. برای اولین بار در پل‌های جاده چهارم (اسکاتلند)، پل 25 de Abril (فرانسه)، پل کانمون، اکثر پل‌های هانشو-شیکوکو استفاده شده‌اند. که بعداً در پل‌های سِورِن، بوسفر، سلطان محمود فاتح، و پل‌های کورشیما کایکو به کار برده شدند. برای نصب برج‌های فولادی، از شناورجراثقال، و جرثقیل حرکت کننده، استفاده می‌شود. در شکل

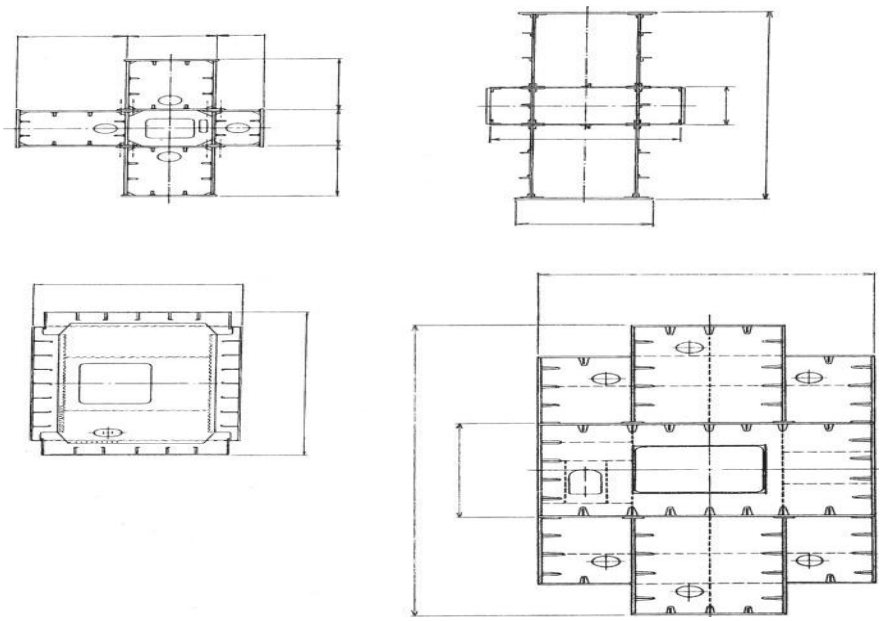
(۲-۵۷) ساخت برج پل اکاشی کایو با استفاده از جراثقال نشان داده شده است. برج پل اکاشی کایو ۲۹۷ متر ارتفاع داشت.



شکل (۲-۵۷): ساخت برج اصلی پل آکاشی کایکو [۲]

سطح مقطع آن از سه سلول با نبشی‌های کوتاه (گوشه دار) که در شکل (۲-۵۹) نشان داده شده است درست شده است. شفت (محور)های عمودی به ۳۰ بخش تقسیم شده‌اند. این بخش‌ها که به صورت پیش ساخته بودند با قایق به سایت منتقل می‌شدند. صفحه زیرین و اولین مقطع با استفاده از جرثقیل شناور ایجاد شد. در ادامه با استفاده از یک جراثقالی که بر روی برج شمع‌ها ایجاد شده بود ساخت و ساز ادامه یافت. یکی از نکات مهم در طراحی این برج‌ها ارتفاع ۲۹۷ متری آنها است که تقریباً با برج معروف توکیو برابری می‌کند و در نتیجه به شدت تحت تأثیر نیروی باد قرا می‌گیرد. برای حل این مشکل مهندسین مقطع عرضی این برج‌ها را به شکل صلیب طراحی کرده‌اند و برای کاهش اثرات پیچشی نیروی باد از میراگرهای TMDوAMD استفاده کردند. این میراگرها هر کدام ۱۰ تن وزن دارند و ۲۰ عدد از آنها در قطعات هفدهم - هجدهم و بیست و یکم از ۳۰ قطعه اصلی قرار گرفته‌اند.

شکل (۲-۵۸): استفاده از میراگر پاندولی در پایه ها جهت کاهش حرکت جانبی



شکل (۲-۵۹): انواع سطح مقطع شفت برجها [۲]

۲-۱-۲-۵ برج‌های بتنی [۲]

برجهای پل تسینگ‌ما با ارتفاع ۲۰۶متر، با مقطع عرضی ۶ متر، و در جهت طولی به صورت مخروطی (باریک شونده) با سطح مقطع ۱۸ متر درپایین و ۹ متر در بالا درست شده است. محورهای مرکزی برجها توخالی هستند. هر کدام از برجهای اصلی به صورت پیوسته و با عملیات شبانه روزی با استفاده از دو جراثقال و بالابر بتنی ساخته شدند. که در شکل (۲-۶۰) نشان داده شده است.

شکل (۲-۶۰): ساخت برج بتنی پل تسینگ ما [۲]

۲-۲-۵ ساخت مهارگاه

مهارگاه‌ها سازه‌هایی هستند که کابل‌های برج‌ها در آنها مهار می‌شوند. آنها بلوک‌های بتنی بزرگی هستند که به صخره‌های سخت متصل می‌شوند. در طول ساخت مهارگاه‌ها، میله‌های چشمی قوی‌ای (eyebar) (میله‌های فولادی با سوراخ گرد در انتهای آن) در بتن تعبیه می‌شود. زین اسبی‌ها (spray saddle) در جلو مهارگاه نصب می‌شوند، که هر کدام کابل‌ها را در جایی که به صورت گره هستند مهار می‌کنند هر کدام از گره‌ها به صورت رشته‌ای در می‌آید و در داخل eyebar ها محکم مهار می‌شوند.

شکل (۲-۶۱): تقسیم کابل‌ها به صورت رشته‌ای و مهار آنها در بتن

۵-۲-۳ نصب کابل‌ها

هنگامی که برج‌ها و مهارگاه‌ها تکمیل شد، یک خط راهنمای (pilot line) قوی در طول مسیر نهایی کابل‌ها از یک مهارگاه در مقابل به برج تا مهارگاه دیگر کشیده می‌شود. روش‌های مختلفی برای اجرای جاگذاری خط راهنما وجود دارد. به عنوان مثال در پل آبشار نیاگارا روبلینگ پیشنهاد داد که به اولین جوانی که با استفاده از کایت در طول تنگه پرواز کند و خط راهنما را وصل کند پاداش ۱۰ دلاری خواهد داد. امروزه ممکن است از یک هلی‌کوپتر استفاده شود. یا خط راهنما با استفاده از یک قایق در طول مسیر قرار داده شود و سپس تا محل مورد نظر بالا برده شود. در پل معلق siduhe در چین نیز، به وسیله پرتاب موشک کابل‌ها را از یک پایه به پایه دیگر نصب کردند. برای این منظور آنها کابل‌هایی به طول ۹۷۵ متر را را به موشک می‌بستند و با شلیک دقیق موشک، کابل را به پایه دیگر نصب می‌کردند.

شکل (۲-۶۲): استفاده از موشک برای نصب کابل در پل معلق سیدوهه

یک راه موقت (catwalk) در طول مسیر پل، در زیر خط راهنما، در حدود ۱ متر ساخته می‌شود، تا کارگران بتوانند کابل‌ها را نصب کنند.

برای شروع ریسیدن کابل‌ها، یک قرقره بزرگ از رشته‌ها در مهارگاه نصب می‌شود. انتهای آزاد رشته‌ها به دور strand shoe حلقه زده می‌شود (یک ناودانی(شیار فلزی) که به یک میله‌ی چشمی eyebar متصل شده است).

بین قرقره و strand shoe، رشته‌ها در اطراف چرخ نخ ریسی که در بر روی خط راهنما قرار دارد حلقه شده‌اند. این چرخ، سیم را در طول پل حمل می‌کند و در مهارگاه مقابل در حول starnd shoe حلقه می‌زند. سپس چرخ به مهارگاه اول بر می‌گردد تا سیم دیگری را در محل خود قرار دهد. این فرایند آنقدر تکرار می‌شود تا یک گروه از رشته سیم‌های طراحی شده ایجاد شود (بین ۱۲۵ رشته تا بیشتر از ۴۰۰ رشته متغیر است).

شکل (۲-۶۳): اتصال کابل‌های آویز به کابل اصلی

شکل (۲-۶۴): نصب بست‌ها بروی کابل‌های اصلی در عرشه موقت

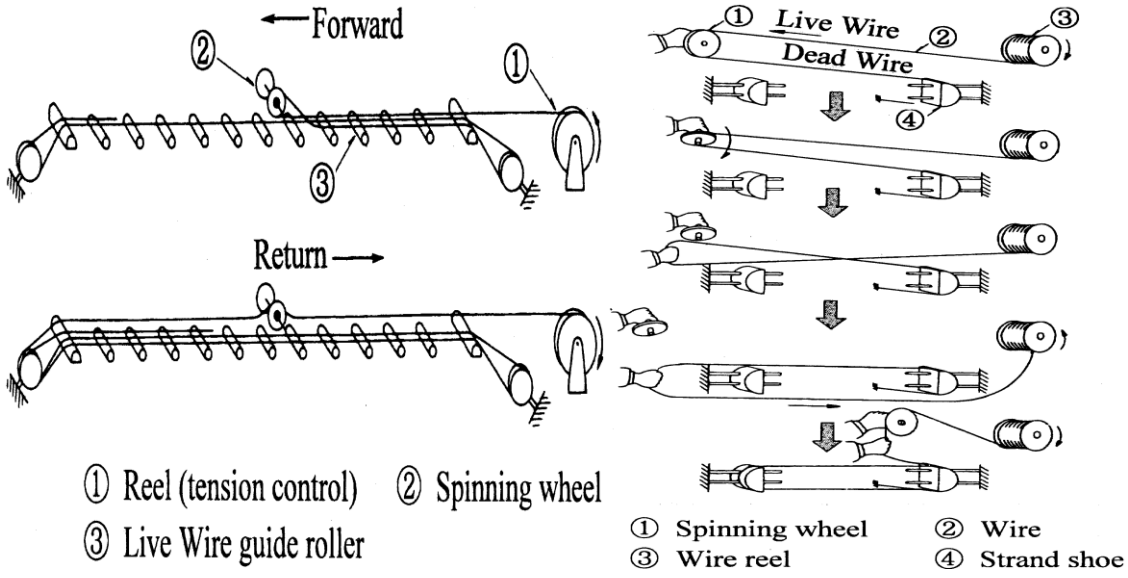
در طول نخ ریسی، کارگران بر روی عرشه موقت می‌ایستند تا از باز شدن آرام و هرگونه پیچ خوردن سیم مطمئن شوند. هنگامی که بسته‌ها (کلاف) به اندازه‌ی کافی ضخیم شدند، نوار یا تسمه سیم بر روی کابل‌های عمودی در جاهای مشخص شده بر روی کابل‌های اصلی نصب می‌شوند، هنگامی کابل‌های عمودی به کابل اصلی وصل شدند، سازه روسازه باید از هر دو طرف تکیه‌گاه برج‌ها به صورت دقیق ساخته شود تا در تمامی زمان‌ها نیروها به طور مساوی به برج‌ها منتقل شود و تعادل حفظ شود.

۵-۲-۳-۱ روش چرخان (نخ ریسی) هوایی [۲]

روش چرخان هوایی (روش AS) برای کابل‌های سیم‌موازی توسط جان‌ای اختراع شد. روبلینگ (مهندس امریکایی که در آلمان به دنیا آمد و پل بروکلین را ساخت) برای اولین بار در پل آبشار نیگارا با طول دهانه مرکزی ۲۴۶ متر، که درسال ۱۸۵۵ میلادی کامل شد به کار برد. او از این فن در پل بروکلین جایی که سیم‌های فولادی

برای اولین بار استفاده شد به کار برد. اکثر پل‌های ساخته شده در ایالات متحده از زمان گسترش روش AS روبلینگ از کابل‌های سیم موازی استفاده کرده‌اند. در مقابل، در اروپا از کابل‌های رشته‌ای در ساخت پل جاده چهارم که در سال ۱۹۶۶ ساخته شده بود استفاده کرده‌اند.

به طور معمول در روش AS، سیم‌های مخصوصی در شرایط free- hang آویزان می‌شوند و هر سیم به طور جداگانه از وسط خم می‌شود تا تمام سیم‌ها طول مساوی داشته باشند. که در اصطلاح به این روش کنترل آویزگفته می‌شود، کیفیت کابل‌ها و طول مدت ساخت احتمالاً تحت تأثیر: شرایط محیط کاری، از جمله شرایط باد و دسترسی به تجهیزات کابل‌های آویزان قرار گیرد. این نیز به تعداد زیادی نیروی کار برای تنظیم کردن آویزها نیازمند است.



شکل (۲-۶۵): مراحل روش چرخان هوایی[۲]

شکل (۲-۶۶): مراحل روش کنترل تنش [۲]

روش جدید که به روش کنترل تنش معروف است در ژاپن توسعه یافته است (در شکل (۲-۶۶) نشان داده شده است). این ایده تنش را در سیم‌ها در طول چرخش کابل ها ثابت نگه می‌دارد تا یک طول یکنواخت از سیم بدست آید. این روش در پل‌های هیرادو، شیموتسویی-ستو ، بسفر۲ و کمربند بزرگ شرق استفاده شده است.

شکل (۲-۶۷): استفاده از روش چرخان هوایی در پل شیموتسویی- ستو و پل سیدوهه

۵-۲-۳-۲ روش پیش ساختگی رشته سیم‌های موازی[۲]

در حددود سال ۱۹۶۵، روش پیش‌ساختگی کابل‌های سیم موازی گسترش یافت تا نیاز قطع کار برای کابل‌های آویزان در محل کار در روش AS برطرف شود. روش رشته سیم‌های موازی پیش‌ساخته (روش PS) برای اولین بار در پل New Port به کار برده شد.

۵-۲-۴ سازه‌های معلق[۲]

روش‌های مختلفی برای احداث سازهای معلق وجود دارد. عموماً آنها با توجه به نوع سازه و شرایط طبیعی محلی و شرایط اجتماعی توسعه می‌یابد.

۵-۲-۴-۱ روش‌های اتصال بلوک‌های شاهتیرها [۲]

اتصال بین شاهتیرهای سخت کننده ممکن است با استفاده از یکی از دو روش زیر انجام شود.

۵-۲-۴-۱-۱ روش تمام مفصلی [۲]

در این روش تا زمانی که تمام مقطع تیرها در سر جای خود قرار بگیرند به صورت اتصال ضعیف به هم وصل می‌شوند. این روش باعث تحلیل ساده و آسان رفتار شاهتیرها در زمان ساخت را فراهم می‌کند. هرگونه تقویت موقت

اعضا معمولاً غیر ضروری است. اگر چه بدست آوردن پایداری آیرودینامیکی سخت است مگر اینکه سازه‌ها نیروهای باد را به مفصل‌ها منتقل کنند که از این روش در پل کوروشیما کایکو به عنوان نمونه استفاده شده است.

۵-۲-۴-۲-۱ روش اتصال صلب [۲]

در این روش همه‌ی مفصل‌ها بلافاصله کامل می‌شوند و هر بلوک در سر جای خود نصب می‌شود. در این روش شاهتیرها صاف و صلب هستند، و پایداری آیرودینامیکی خوبی را ایجاد می‌کند و دقت ساخت و ساز بالاست. اگرچه بعضی مواقع تقویت موقت شاهتیرها وHanger rope ها برای مقاومت در برابر تنش‌های بیش از حد عبور و مرور و یا کنترل عملکرد در برابر تنش‌های بیش از حد، لازم است.

۵-۲-۴-۲ روش‌های نصب(جاگذاری) شاهتیرها [۲]

شاهتیرهای سخت کننده معمولاً با استفاده از روش مقاطع شاهتیرها (Girder-Section Method) یا به طور طره‌ای از طریق برج‌ها یا مهارگاه‌ها در جای خود قرار داده می‌شوند.

۵-۲-۴-۲-۱ Girder-Section Method [۲]

پس از نصب آویزها نوبت نصب عرشه می‌شود. عرشه در تکه‌هایی جدا از هم و در کارگاهی در کنار محل احداث پل ساخته می‌شوند و در روی پل به همدیگر با استفاده از پیچ بهم متصل می‌شوند تا عرشه یکپارچه‌ای را ایجاد نمایند. در جدیدترین روش‌ها از یک جرثقیل متحرک که بر روی کابل‌های اصلی حرکت می‌کند برای نصب عرشه استفاده می‌شود که به جای آن می‌توان از دیگر ابزارها نظیر جرثقیل‌های شناور نیز استفاده کرد. مهمترین مسئله در نصب عرشه حفظ تعادل کابل‌ها و پایه‌ها می‌باشد و به همین خاطر عرشه را یا از وسط دهانه و بصورت یکسان از هر سمت به طرف پایه‌ها می‌سازند و یا از کنار پایه‌ها به سمت وسط دهانه شروع به ساخت می‌کنند.

حالت روش girder-section با آویزهای متصل در شکل (۲-۶۸) نشان داده شده است.

شکل (۲-۶۸): نصب عرشه با استفاده از روش girder-section [۲]

۲-۲-۴-۲-۵ روش طره‌ای (Cantilevering method)[۲]

نمونه اخیر برای روش طره‌ای شاهتیرهای پل آکاشی‌کایو بود که در شکل (۲-۶۹) نشان داده شده است. قطعات پیش‌ساخته شاهتیرهای خرپایی سخت‌کننده با گسترش شاهتیرهای سخت‌کننده به عنوان طره در برج‌ها و لنگر-گاه‌ها نصب می‌شدند. این روش ایجاد اختلال در ترافیک‌های دریایی را که در روش GERDER SECTION وجود داشت برطرف می‌کرد.

شکل (۲-۶۹): نصب عرشه با استفاده از روش طره‌ای در پل آکاشی کایکو [۲]

۵-۲-۵ اندازه گیری کارگاهی [۲]

بعد از اتمام ساخت عرشه، روی آن را با لایه مناسبی می‌پوشانند و سپس خطوط برق و روشنایی و تابلوهای ایمنی و ... را نصب می‌کنند تا بعد از آزمایش بارگذاری و تایید مجوز بهره برداری پل آماده سرویس‌دهی شود.

۵-۲-۵-۱ آزمایش بارگذاری [۲]

هدف اصلی آزمون بارگذاری تایید ایمنی رفتار استاتیکی و دینامیکی پل است. آزمایش بارگذاری استاتیکی برروی پل‌های واکاتو،کانمون و رئیس جمهور موبوتو سسی-سکو با استفاده ازوسایل نقیله سنگین بر روی پل انجام شد. روش‌های بررسی رفتار دینامیکی شامل: آزمایش‌های ارتعاش و اندازه گیری میکرو نوسانات (نوسانات خیلی کوچک)که توسط باد آرام ایجاد می‌شود است. آزمایش‌های گذشته براساس اندازه‌گیری پاسخ در اثر ارتعاش اجباری بود. ویژگی‌های دینامیکی پل مانند: میرایی سازه، فرکانس طبیعی و مد ارتعاش با استفاده از آزمایش ارتعاش بدست می‌آید. از آنجایی که برآورد میزان میرایی سازه با استفاده از تئوری مشکل است بنابراین مقدار آن با استفاده از اندازه‌گیری واقعی باید تعیین شود. نمونه‌هایی از داده‌های اندازه‌گیری میرایی سازه که از طریق آزمون ارتعاش به دست آمده در جدول (۲-۱) نشان داده شده است.

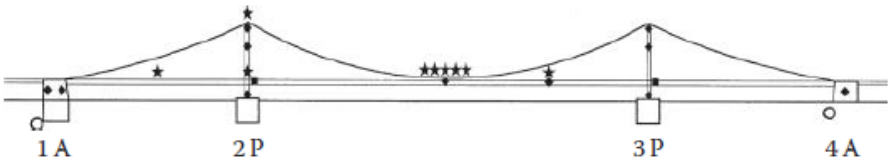
جدول (۲-۱): میرایی بدست آمده از طریق آزمون ارتعاش [۲]

Bridge	Center Span Length (m)	Logarithmic Decrement[a]
Minani Bisa-Seto	1100	0.020–0.096
Ohnaruto	876	0.033–0.112
Kanmon	712	0.016–0.062
Ohshima	560	0.017–0.180

[a] Structural damping.

۵-۲-۶ مشاهدات کارگاهی(میدانی)[۲]

مشاهدات میدانی به منظور بررسی بعضی ویژگی‌های رفتاری پل‌ها مانند پایداری دینامیکی و مقاومت در برابر زلزله است که برای تایید ایمنی پل است. برای جمع‌آوری اطلاعات لازم برای صدور مجوز تایید، ابزارهای اندازه‌گیری گوناگونی در پل‌های معلق نصب می‌شود. نمونه هایی از ابزار های اندازه گیری در شکل (۲-۷۰) نشان داده شده است.



Symbol	Name of instruments
★	Wind vane and anemometer
◆	Accelerometer displacement speedmeter
■	Deckend displacement gauge
○	Seismometer

شکل (۲-۷۰): جاگذاری وسایل اندازه‌گیری در پل آکاشی کایو [۲]

یک بادنما و بادسنج که برای اندازه‌گیری شرایط بادهای محلی و لرزه‌نگار برای مشاهده فعالیت‌های لرزه‌ای، که برای جمع‌آوری اطلاعات در شرایط طبیعی است. شتاب‌نگاشت و زلزله‌نگار (اندازه‌گیری سرعت جابجایی‌ها) برای اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی سازه تحت بارهای باد و زلزله نصب شده است. در انتهای عرشه وسایلی برای اندازه‌گیری آهنگ (میزان تغییرات) پاسخ دینامیکی در اثر بارهای ترافیکی وجود دارد.