

اصول مهندسی پل



فصل اول

آشنایی با انواع پل ها

مدرس: دکتر محمد رضا میرجلیلی

دانشگاه یزد- نیم سال اول ۹۵-۹۶

(توضیح: مطالب این جزوه در حد اختصار بوده و توضیحات تکمیلی در کلاس درس ارائه خواهد شد)



۱- انواع طبقه بندی پل ها

- الف- طبقه بندی پل ها از نظر جنبه طول دهانه - ۱- پل های دهانه کوتاه $Li \leq 8m$
۲- پل های دهانه متوسط $8m < Li \leq 50m$
۳- پل های دهانه بلند $Li > 50m$
- ب- طبقه بندی پل ها از نظر سیستم سازه ای (سیستم سازه ای عرشه) ۱- پل های صفحه ای (بتنی)
۲- پل های تیر و شاه تیر (بتنی و فلزی)
۳- پل های خرپای
۴- پل های معلق (کابلی)
۵- پل های ترکیه ای (کابلی)
۶- پل های قوسی
- پ- طبقه بندی پل ها از نظر مصالح مورد استفاده ۱- بتن آرمه
۲- فولادی
۳- بتن پیش تنیده
۴- بتن پیش ساخته (کارخانه ای)
۵- مرکب (ترکیبی از بتن و فولاد)
۶- مصالح بنایی (سنگی، آجری، چوبی)
۷- آلومینیومی
- ت- طبقه بندی پل ها از نظر کاربرد و استفاده ۱- پل های جاده ای
۲- پل های راه آهن
۳- پل های پیاده رو
۴- پل های رودخانه ای
۵- پل های روگذر و زیرگذر
۶- پل های خطوط انتقالی (آب، گاز، نفت و ...)
- ث- طبقه بندی پل ها از نظر نحوه اجرا ۱- پل های درجا
۲- پل های پیش ساخته
۳- پل های طره ای



۲- فرم های سازه ای پل ها

از دیدگاه سیستم سازه ای پل ها را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

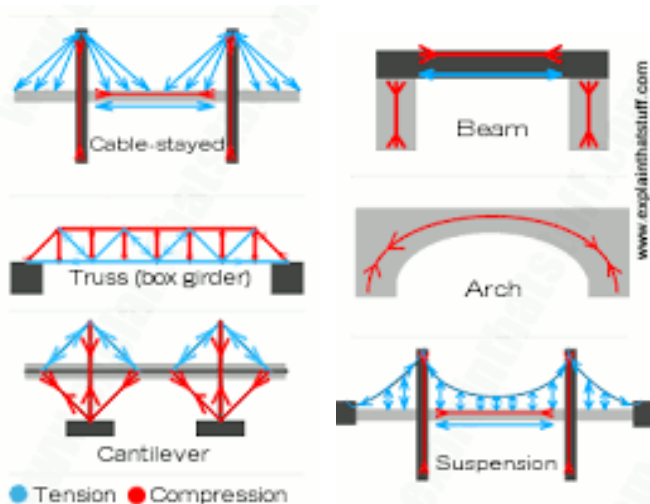
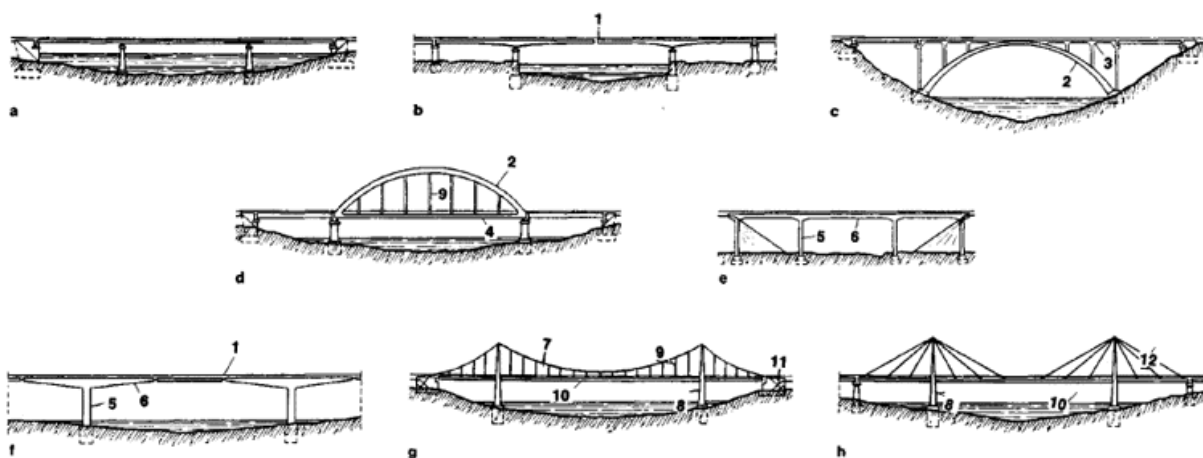
الف) پل های معلق Suspension Bridges

ب) پل های کابلی Cable-Stayed Bridges

ب) پل های قوسی Arch Bridges

پ) پل های خرپایی Truss Bridges

ت) پل های تخت یا صفحه ای Girder Bridges



شکل ۱- انواع پل از نظر سیستم سازه ای

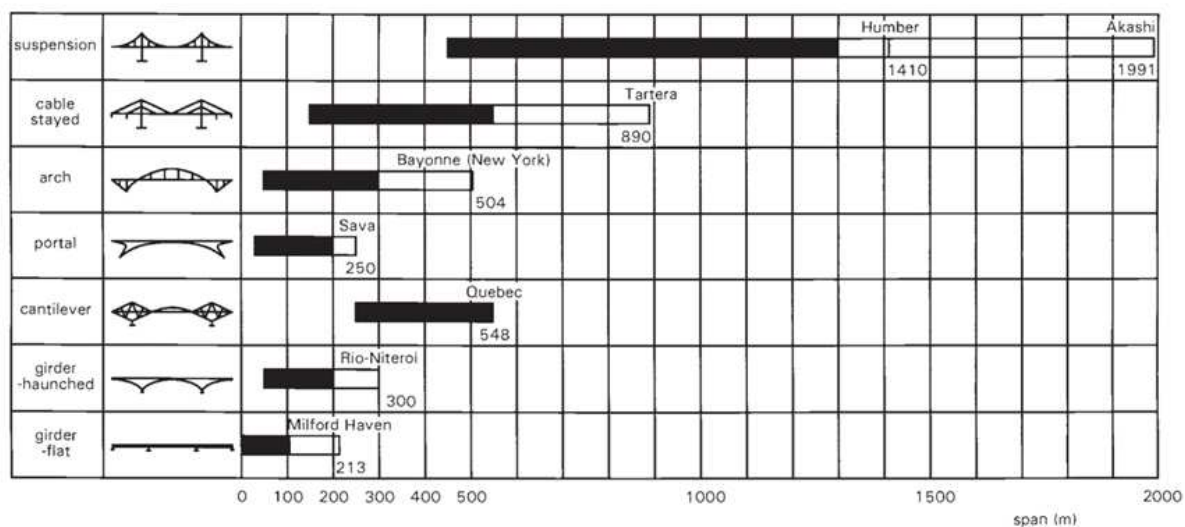
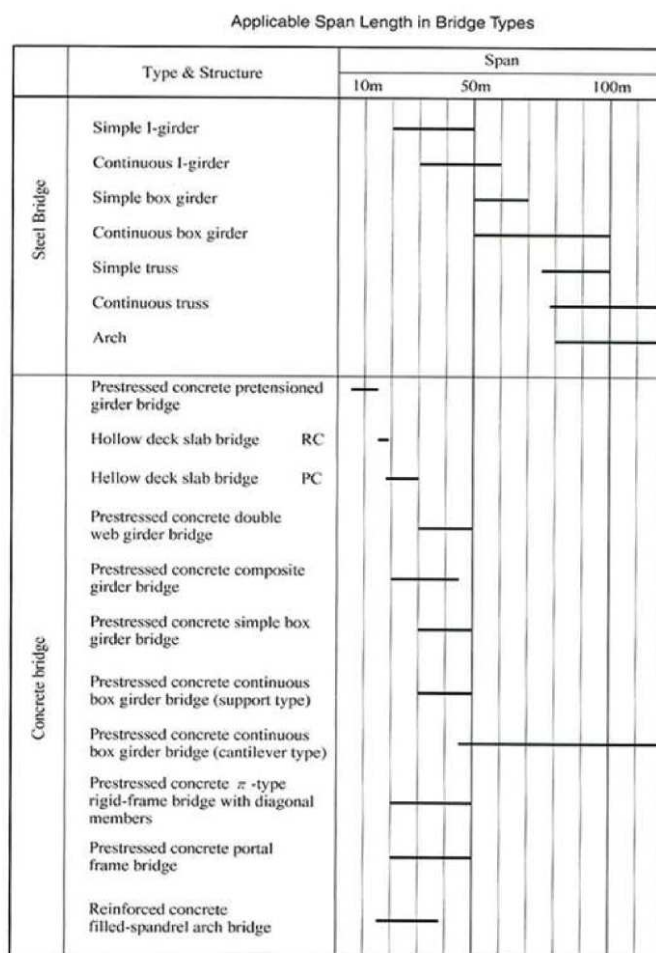


Fig. 4.2 Normal span range of bridge types

شکل ۲- دهانه های رایج و کاربردی انواع سیستم های سازه ای پل



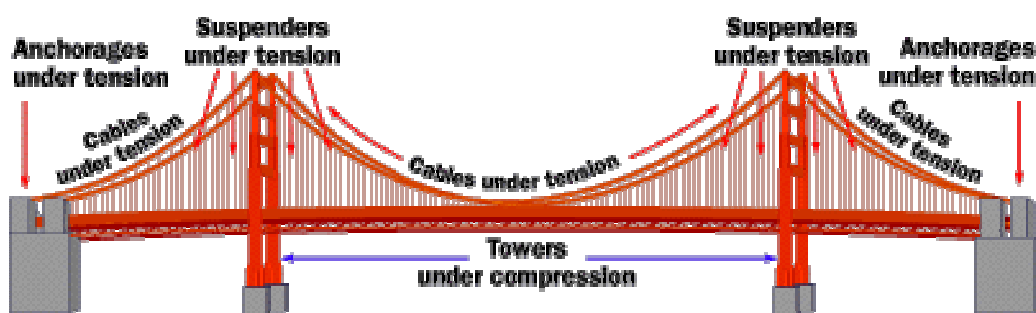
شکل ۳- دهانه کاربردی برای پلهای تخت



۲-۱- پل های معلق

پلهای معلق مدرن با کابلهای آویز ثانوی قائم یا مثلثی برای دهانه‌های بیش از ۳۰۰ متر اقتصادی هستند. اگر از عبورگاه فلزی که سبکتر از نوع بتنی می‌باشد استفاده شود مقرون به صرفه تر خواهد بود. اخیرا طرحی برای پلی به دهانه ۳۰۰۰ متر از نوع پل معلق داده شده است که قرار هست بر روی تنگه مسینا بین ایتالیا و سیسیل ساخته شود.

در شکل زیر نحوه انتقال نیرو در پلهای معلق نشان داده شده است.





۲-۱-۱- بلند دهانه ترین پل های معلق جهان

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Akashi-Kaikyo	1991	Kobe-Naruto	Japan	1998
2	Yangsigang	1700	Wuhan	China	2019
3	Xihoumen	1650	Zhoushan	China	2009
4	Great Belt East	1624	Korsor	Denmark	1998
5	Izmit	1550	Gebze	Turkey	2017
6	Yi-Sunsin	1545	Myodo-Gwangyang	South Korea	2013
7	Runyang South	1490	Jiangsu	China	2005
8	Nanjing-4	1418	Nanjing	China	2012
9	Humber	1410	Kingston-upon-Hull	UK	1981
10	Yavuz Sultan Selim	1408	Istanbul	Turkey	2016
11	Jiangyin	1385	Jiangsu	China	1999
12	Tsing Ma	1377	Hong Kong	China	1997
13	Hardanger	1310	Vallavik-Bu	Norway	2013
14	Verrazano-Narrows	1298	New York, NY	USA	1964
15	Golden Gate	1280	San Francisco, CA	USA	1937
16	Yangluo	1280	Wuhan	China	2007
17	Höga Kusten	1210	Kramfors	Sweden	1997
18	Longjiang	1196	Yunnan	China	2015
19	Jinshajiang Taku	1190	Yunnan	China	2020
20	Aizhai	1176	Jishou	China	2012
21	Mackinac	1158	Mackinaw City, MI	USA	1957
22	Ulsan	1150	Ulsan Harbour	South Korea	2015
23	Hålogaland	1145	Rombakk fjord	Norway	2017
24	Qingshuihe	1130	Guizhou	China	2016
25	Huangpu-1	1108	Guangzhou	China	2008
26	Minami Bisan-seto	1100	Kojima-Sakaide	Japan	1988
27	Daduhe Luding	1100	Sichuan	China	2018
28	Fatih Sultan Mehmet	1090	Istanbul	Turkey	1988
29	Balinghe	1088	Guanling	China	2009
30	Taizhou	1080	Jiangsu	China	2012



Akashi Kaikyō Bridge



Xihoumen Bridge



Great Belt Bridge



Osman Gazi Bridge



Yi Sun-sin Bridge



Runyang Bridge



Nanjing Yangtze Bridge



Humber Bridge



Yavuz Selim Bridge



Jiangyin Bridge



Tsing Ma Bridge



Hardanger Bridge



Verrazano Bridge



Golden Gate Bridge

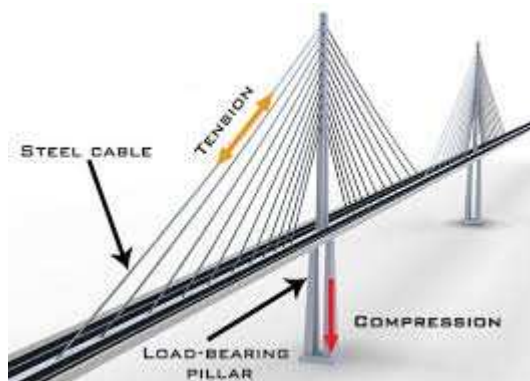


Yangluo Bridge

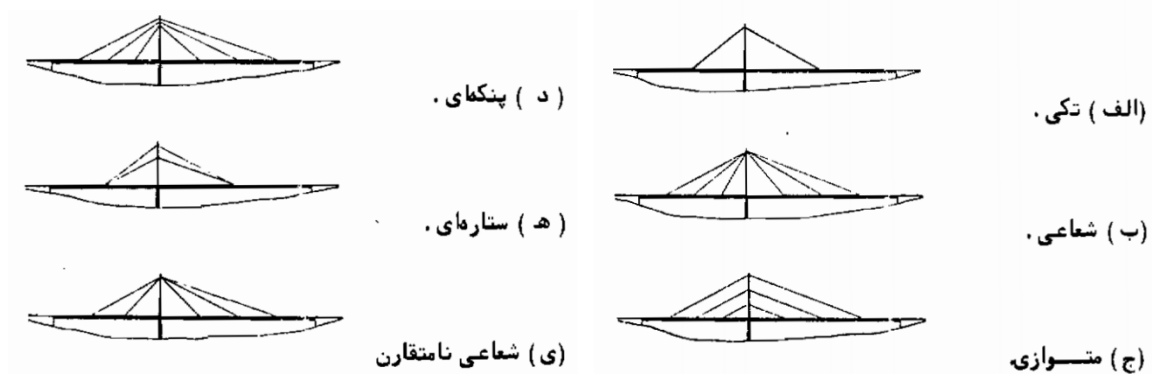


۲-۲- پل های کابلی

پلهای ترکیه‌ای یا کابلی با عبورگاه بتنی برای دهانه‌های ۱۰۰ الی ۷۰۰ متر اقتصادی بوده و با استفاده از عبورگاه فولادی می‌توان دامنه اقتصادی را افزایش داد. انواع مختلف این نوع سازه‌ها در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. پل‌های وادی کاف در لیبی و پل راین در آلمان غربی نمونه‌هایی از این نوع سازه به شمار می‌روند.



نحوه اتصال کابلها به برج پل می تواند متفاوت باشد. در ادامه حالت های مختلف پل کابلی نشان داده شده است.





۱-۲-۲- بلند دهانه ترین پل های کابلی جهان

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Russky	1104	Vladivostok	Russia	2012
2	Hutong	1092	Jiangsu	China	2018
3	Sutong	1088	Suzhou-Nantong	China	2008
4	Stonecutters	1018	Hong Kong	China	2009
5	Edong	926	Hubei	China	2009
6	Tatara	890	Onomichi-Imabari	Japan	1999
7	Pont de Normandie	856	Le Havre	France	1995
8	Jiujiang	818	Hubei	China	2012
9	Jingsha	816	Hubei	China	2009
10	Wuhu-2	806	Anhui	China	2017



Rusky Bridge



Sutong Bridge



E'dong Bridge



Tatara Bridge



Pont de Normandie



Jiujiang Fuyin Bridge



Jingyue Bridge



Incheon Bridge



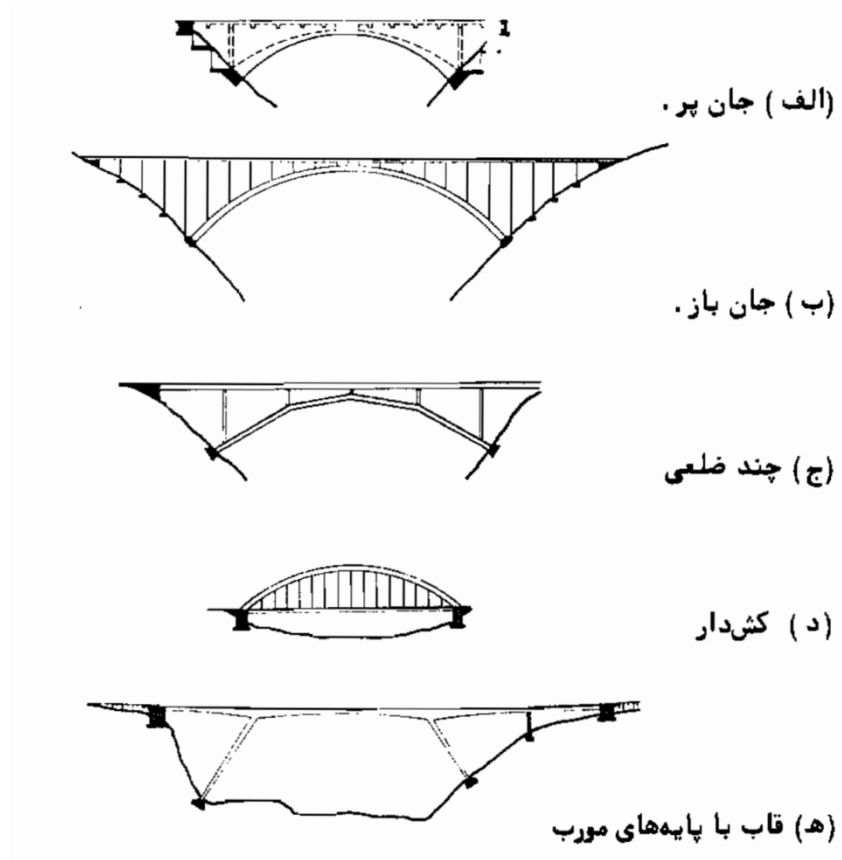
Xiamen Bridge



۲-۳- پل های قوسی

در صورت مناسب بودن شرایط فونداسیون محل احداث پل، برتری پل قوسی نسبت به سایر انواع پل از قدیم تشخیص داده شده است. با انتخاب مناسب پروفیل طولی یک قوس نیروی داخلی ایجاد شده در سازه در اثر اعمال بارهای خارجی از جمله بار مرده وزن سازه عمدتاً فشار ساده می باشد. باتوجه به مقاومت فشاری بالای مصالح بتن، این مصالح برای ساخت پلهای قوسی ایده آل می باشد. در صورتیکه اثرات بار نامتقارن، تغییر درجه حرارت، انقباض و خزش بتن در نظر گرفته شود علاوه بر نیروی فشاری، نیروی کششی و لنگر خمشی نیز در سازه ایجاد می گردد. برای مقابله با این نیروها در صورت لزوم می توان از مصالح بتن آرمه استفاده کرد. چون نیروی اصلی داخلی در قوسها فشاری می باشد بنابراین مصرف میلگردهای فولادی در این نوع سازه معمولاً کمتر از انواع دیگر سازه های بتن آرمه می باشد.

از نظر تراز قرارگیری عبورگاه نسبت به قوس عبورگاه این نوع پلها را می توان به سه قسم تقسیم کرد. نوع اول که بیشتر معمول است عبورگاه در بالا بوده که تمامی قوس در زیر عبورگاه واقع می شود. نوع دوم عبورگاه در میان و نوع سوم عبورگاه در زیر می باشد که در حالت اخیر قوس در قسمت بالای عبورگاه واقع است. قوسهای واقعی را می توان به انواع پنجگانه زیر تقسیم کرد.

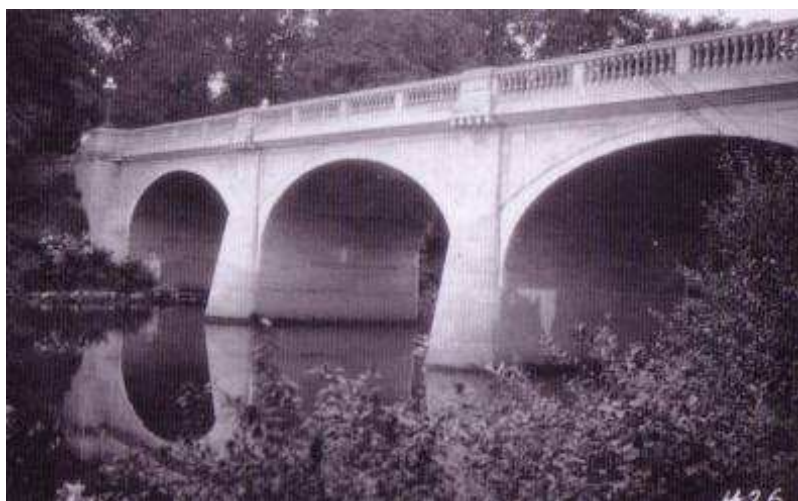


شکل ۴- انواع قوس ها



۲-۳-۱- قوس های با جان پر

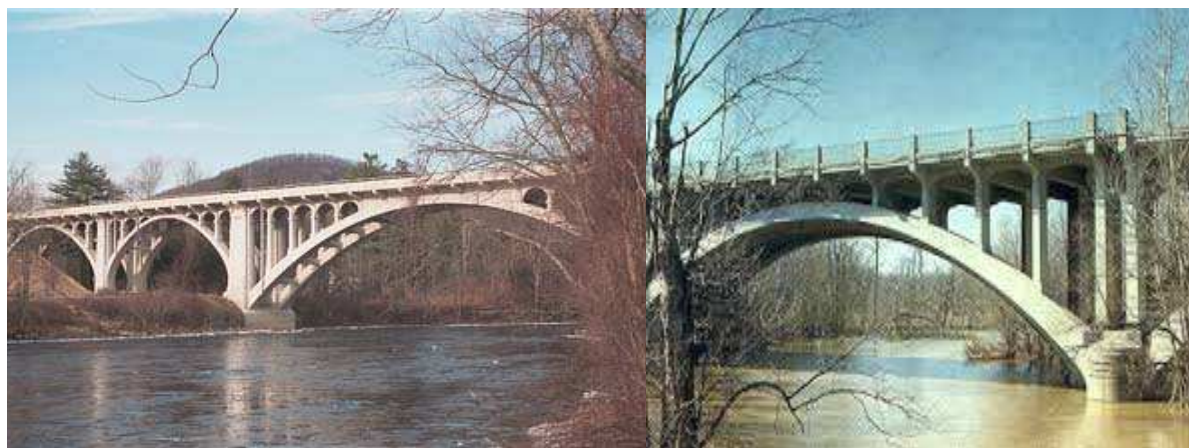
قوس های با جان پر امروزه بیشتر برای دهانه های کوتاه بخصوص در ابنیه فنی راهها مورد استفاده قرار می گیرد. در قدیم این نوع سازه زیاد به کار برده می شد. مزیت این نوع سازه آنست که با استفاده از مصالح بنائی نیز می توان آن را ساخت.



۲-۳-۲- قوس های با جان باز

قوسهای یا جان باز امروزه با استفاده از مصالح بتن آرمه، بتن پیش تنیده و یا فولاد تا دهانه ۳۰۰ متر ساخته می شود. عبورگاه این نوع پل ها در قسمت بالا قرار داشته و از آن در ساخت پلهای بر روی دره های عمیق می توان استفاده کرد.





۲-۳-۳- قوس های کش دار

قوسهای کش دار را در شرایطی که وضعیت فونداسیون ها مناسب نباشند و نیز حداکثر فضا در زیر پل مورد نیاز باشد می توان به کار برد. عبورگاه این نوع پل ها معمولا در قسمت پائین قوس اصلی قرار داشته که از دید عابرین می کاهد. دهانه معمول برای این نوع پل ها ۱۰۰ الی ۲۰۰ متر می باشد. ساخت این نوع سازه با استفاده از مصالح فولاد بیشتر رایج است.





۲-۳-۴- قاب با پایه های مایل

قابها با پایه های مایل امروزه در ساخت پل های بر روی جاده های پر رفت و آمد و اتوبانها خیلی معمول شده است. این یکی بدلیل نداشتن پایه وسط و دیگری زیبایی ظاهری آن می باشد. چون پروفیل طولی این سازه قوس کامل نمی باشد بنابراین در عبورگاه نیروهای برشی و لنگر خمشی و لنگر پیچشی نیز ایجاد می گردد.





۲-۳-۵- بلند دهانه ترین پل های قوسی فولادی

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Chaotianmen	552	Chongqing	China	2009
2	Lupu	550	Shanghai	China	2003
3	New River Gorge	518	Fayetteville, WV	USA	1977
4	Bosideng	513	Sichuan	China	2012
5	Bayonne	504	New York, NY	USA	1931
6	Sydney Harbour	503	Sydney	Australia	1932
7	Xiangxi	498	Xiangxizhen	China	2017
8	Chenab	467	Katra	India	2019
9	Daduhe Tianwan	466	Sichuan	China	2017
10	Wushan	460	Chongqing	China	2005



Chaotianmen Bridge



Lupu Bridge



New River Gorge Bridge



Bosideng Bridge



Bayonne Bridge



Sydney Harbour Bridge



۲-۳-۶- بلند دهانه ترین پل های قوسی بتنی

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Beipanjiang Qinglong	445	Guizhou	China	2016
2	Wanxian	425	Wanzhou	China	1997
3	Nanpanjiang	416	Yunnan	China	2015
4	Krk-1 (east span)	390	Krk Island	Croatia	1980
5	Almonte	384	Caceres	Spain	2015
6	Yelanghe	370	Guizhou	China	2017
7	Jialing	364	Sichuan	China	2012
8	Jiangjiehe	330	Weng'an	China	1995
9	Tajo Railway	324	Caceres	Spain	2015
10	Hoover Dam Bypass	323	Boulder City, NV	USA	2010



Wanxian Bridge



Krk Bridge



Mike Tillman Memorial Bridge



Gladesville Bridge



Friendship Bridge



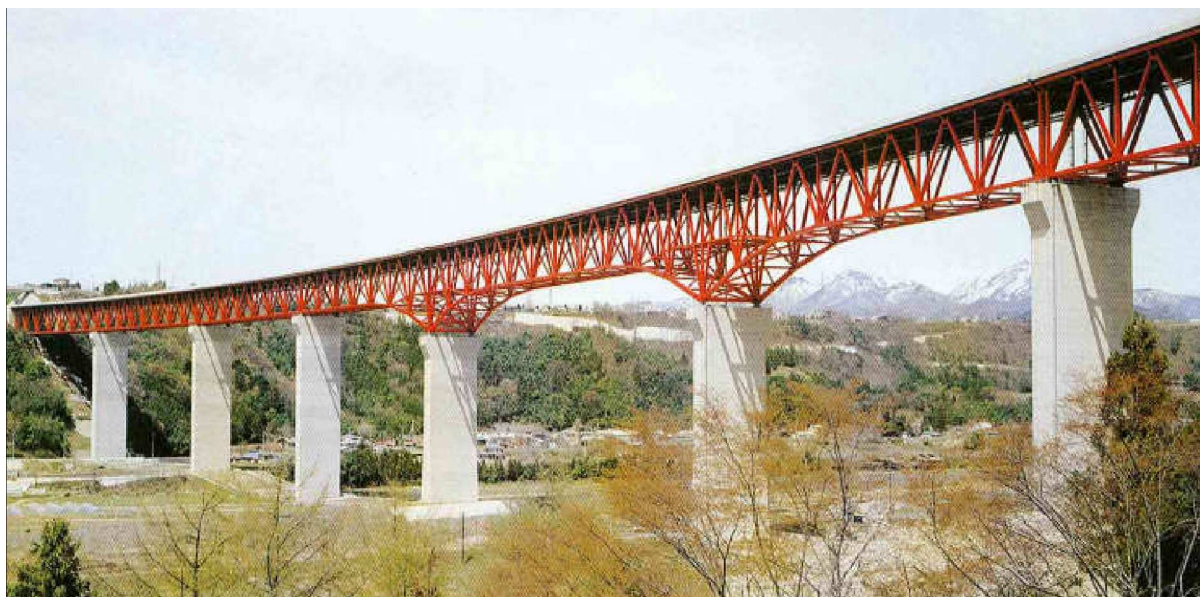
Infante Henrique Bridge



۲-۴- پل های خرابایی

این نوع پل ها را معمولا از اعضای فولادی می سازند که تحمل فشار و کشش یکسانی را داشته باشند. خراباها در جهت طولی پل به تعداد معمولا دو عدد بکار گرفته می شوند که در واقع عمل تیر حمال را انجام می دهند و بار وارد به عبورگاه را به پایه ها انتقال می دهند. مقاومت داخلی خرپا عمدتا فشار و یا کشش ساده می باشد.





۲-۴-۱- بلند دهانه ترین پل های خرابایی

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Pont de Quebec	549	Quebec City	Canada	1917
2	Firth of Forth	521	Edinburgh	UK	1890
3	Minato	510	Osaka	Japan	1974
4	Commodore Barry	501	Chester, PA	USA	1974
5	Greater New Orleans-1	480	New Orleans, LA	USA	1958
6	Greater New Orleans-2	480	New Orleans, LA	USA	1988
7	Howrah	457	Calcutta	India	1943
8	Veterans Memorial	445	Gramercy, LA	USA	1995
9	Tokyo Bay	440	Tokyo	Japan	2010
10	Transbay	427	San Francisco, CA	USA	1936



Pont de Quebec



Firth of Forth



Minato



Commodore Barry



Greater New Orleans

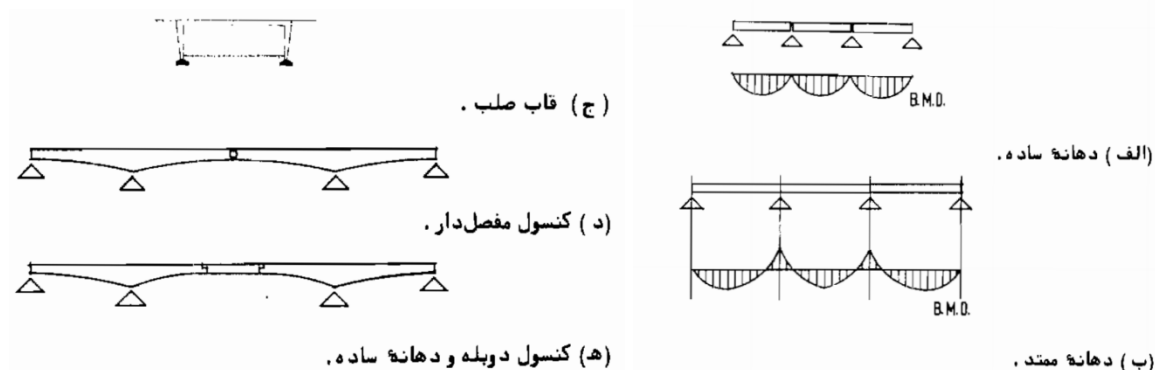


Howrah



۲-۵- پل های تخت یا صفحه ای

عبورگاه این پلها معمولا از انواع دال تخت، دال و تیر و یا تیر تنها ساخته می شود. مقطع عبورگاه در طول دهانه ممکن است ثابت یا متغیر باشد. از نظر استاتیکی عبورگاه بصورت دهانه ساده یا یکسره بر روی چند دهانه و یا ممکن است در یک یا چند دهانه بصورت ساده کنسولی ساخته شود. این نوع پلها برای دهانه کوتاه تا متوسط بکار برده می شوند.



عبورگاه با دهانه ساده بر روی چند تکیه گاه احتیاج به درز انبساط داشته که اگر به دقت ساخته شود گرانیقمت خواهد بود و در غیر اینصورت به مرور زمان در اثر عبور و مرور وسایل نقلیه بر روی پل ناهموارهایی در سطح جاده در محل درز انبساط ایجاد می گردد. برای عبورگاه مشخصی با استفاده از دهانه یکسره بجای دهانه ساده می توان طول دهانه را افزایش داد. در دهانه های یکسره معمول است که طول دهانه های کناری حدودا ۸۵٪ طول دهانه های میانی انتخاب گردد. این نوع سازه نسبت به سازه با دهانه ساده از ضریب اطمینان بالاتری در مقابل خرابی برخوردار است. سیستم عبورگاه با دهانه ممتد در مقابل عامل تغییرات نشست تکیه گاهی خیلی حساس می باشد و بدین منظور اثرات مربوطه باید به دقت بررسی شوند.





۲-۵-۱- بلند دهانه ترین پل های تخت با عرشه بتنی پیش تنیده

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Shibanpo	330	Chongqing	China	2006
2	Stolmasundet	301	Austevoll	Norway	1998
3	Raftsundet	298	Lofoten	Norway	1998
4	Sundoy	298	Leirfjord	Norway	2003
5	Beipanjiang Shuipan	290	Guizhou	China	2013
6	Sandsfjord	290	Rogaland	Norway	2015
7	Humen-2	270	Guangdong	China	1997
8	Sutong-2	268	Suzhou-Nantong	China	2009
9	Honghe	265	Yuanjiang	China	2003
10	Gateway-1	260	Brisbane	Australia	1986



Shibanpo



Stolmasundet



Raftsundet



Sundoy



Sandsfjord



Honghe



۲-۵-۲- بلند دهانه ترین پل های تخت با عرشه کامپوزیت با شایهتیر/باکس فولادی

No.	Bridge	Span [m]	Location	Country	Year
1	Ponte Costa e Silva	300	Rio de Janeiro	Brazil	1974
2	Neckartalbrücke-1	263	Weitingen	Germany	1978
3	Sava-1	261	Belgrade	Serbia	1956
4	Ponte de Vitoria-3	260	Espirito Santo	Brazil	1989
5	ZooBrücke	259	Cologne	Germany	1966
6	Sava-2 (Gazelle)	250	Belgrade	Serbia	1970
7	Kaita	250	Hiroshima	Japan	1991
8	Namihaya (Shirinashi)	250	Osaka	Japan	1994
9	Auckland Harbour	244	Auckland	New Zealand	1969
10	Trans-Tokyo Bay	240	Kawasaki-Kisarazu	Japan	1997



Ponte Costa e Silva



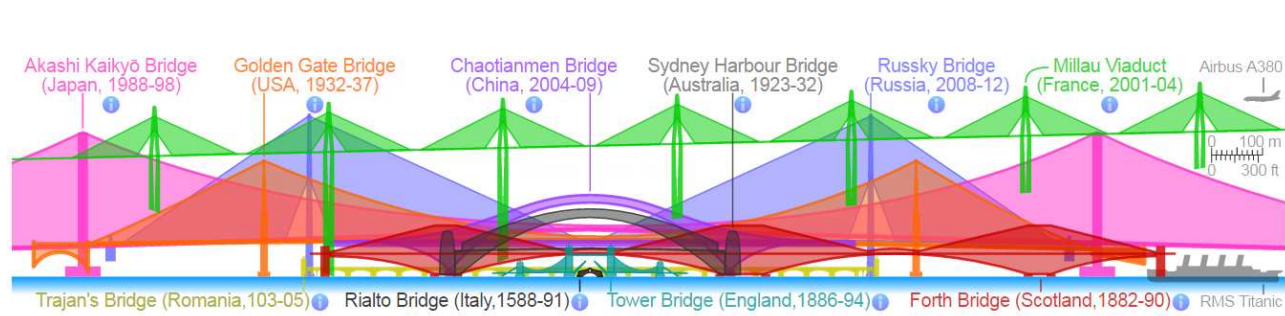
Sava



Namihaya



۲-۶- مقایسه پل های مهم جهان در یک نگاه



شکل ۵- مقایسه پلهای مهم جهان در یک نگاه



۳- روش های ساخت پل^۱

بطور کلی سه روش اصلی برای ساخت پلهای بتنی وجود دارد که عبارتند از:

۱- ریختن بتن در محل با استفاده از قالب.

۲- روش استفاده از قطعات پیش ساخته و نصب آنها در محل.

۳- ترکیبی از روش ۱ و ۲.

روشهای اجرای پلهای بتنی عبارتند از:

۱- با استفاده از داربست ثابتی که مستقیماً بر روی زمین نصب گردد.

۲- به کار بردن داربست متحرک.

۳- روش طره ای آزاد.

۴- روش هل دادن.

۵- روش استفاده از جرثقیل متحرک.

۳-۱- روش داربست ثابت

این روش با ریختن بتن در قالبهایی که توسط داربست ثابت نگهداری می شوند انجام گرفته و احتمالاً قدیمی ترین روش ساخت سازه های بتنی می باشند. از نظر اقتصادی هر چند که دستمزد کارگر و امکانات لازم برای اجرای این روش از یک کشور تا کشور دیگر متفاوت است ولی روی هم رفته برای دهانه های کوتاه تا متوسط (تا دهانه ۳۰۰ متر و ارتفاع حداکثر ۱۰ متر) مقرون به صرفه به نظر می رسد. در قدیم ساخت قالبها با استفاده از تخته های چوبی صورت می گرفته اما امروزه به جای چوب از صفحات فلزی استاندارد استفاده می شود.

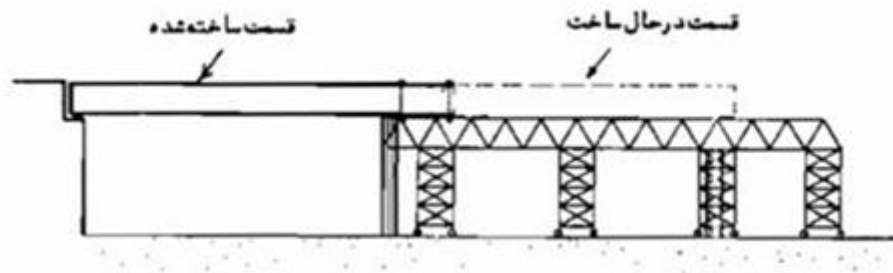


^۱ برگرفته از کتاب مباحث بنیادی پلهای بتنی نوشته سید محمود حسینی، دانشگاه فردوسی مشهد



۳-۲- روش داربست متحرک

بعضی از معایبی را که در روش قبلی وجود دارد می توان با استفاده از روش داربست متحرک برطرف کرد. برای اجرای این روش زمین مقاوم با سطح نسبتاً هموار لازم است.



شکل. مراحل داربست متحرک

اگر وضعیت سطح زمین برای داربست مناسب نباشد یا عبورگاه از سطح زمین ارتفاع زیادی داشته باشد در اینصورت، با به کار بردن تیر مرکبی، که به پایه های ساخته شده پل و یا قسمتی از عبورگاه که ساخته شده است متصل می گردد، می توان از این روش استفاده کرد.

۳-۳- روش طره ای آزاد

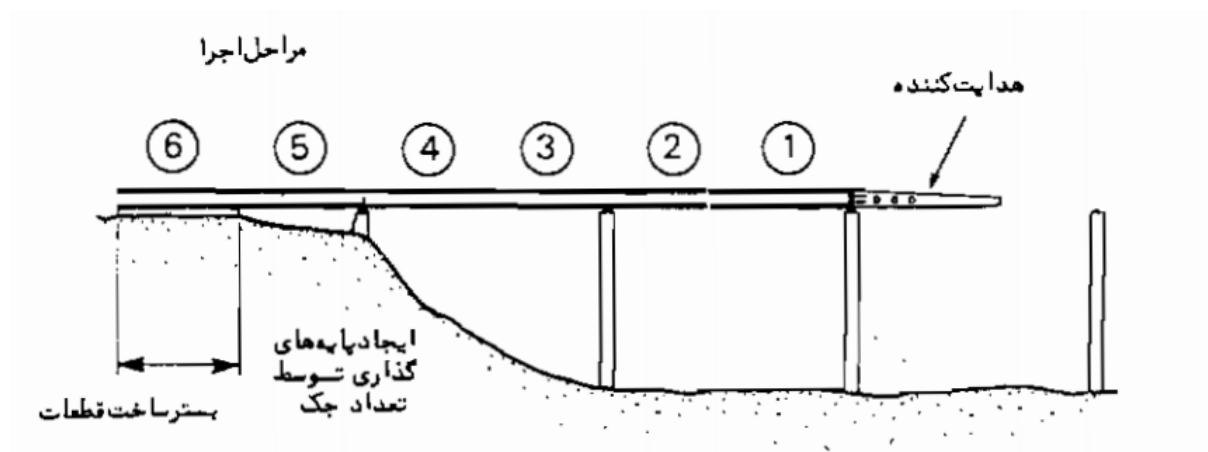
این روش برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ جهت ساخت پل بتن آرمه با دهانه زیاد در آلمان غربی استفاده شد. به طور کلی طرز اجرا همانند شکل زیر می باشد. ساخت عبورگاه پس از تکمیل پایه های پل شروع می شود. ابتدا قسمتی از عبورگاه متصل به پایه به طول مساوی و به صورت کنسولی همزمان در طرفین پایه ساخته می شود بطوری که ممان حاصل از هر کنسول توسط کنسول طرف مقابل خنثی شده و در نتیجه به پایه ممانی وارد نگردد. این مرحله تا کامل شدن نصف دهانه پل ادامه می یابد. طول قطعاتی را که در هر بار قالب بندی شده و بتن ریزی می گردد بستگی به عوامل اقتصادی از جمله مقدار بتن آماده برای هر بار ریختن و امکانات حمل و نقل دارد. قطعات به طول ۳ الی ۵ متر بیشتر معمول می باشد. پس از سخت شدن بتن هر قطعه، آن قطعه به قطعات قبلی تا پایه توسط کابل هایی طوری پس تنیده می گردد که تحمل لنگر منفی ایجاد شده از کنسول یک طرف پایه را داشته باشد. این کار برای پایه مجاور بطور همزمان و یا پس از پایان مرحله ذکر شده تکرار گشته تا اینکه دهانه پل کامل گردد. قبل از اینکه آخرین قطعه جهت اتصال دو کنسول ریخته شود، دو قسمت توسط روش های خاصی به هم قفل می گردند به طوریکه صدمه ای به بتن سخت شده وارد نگردد. پس از تکمیل یک دهانه و سخت شدن بتن، کابل هایی جهت تحمل لنگر مثبت دهانه در عبورگاه جا داده شده و عبورگاه طی مراحل پس تنیده می گردد. بدین ترتیب عملیات از یک دهانه به دهانه دیگر ادامه یافته و سازه یکسره می گردد مزیت عمده این روش با استفاده از بتن درجا یکسره بودن میلگردها در محل اتصال قطعات می باشد. این روش با موفقیت برای ساخت پلهایی تا دهانه ۲۴۰ متر به کار برده شده است. به طور مثال پل هاماناجاسی در ژاپن را می توان نام برد.



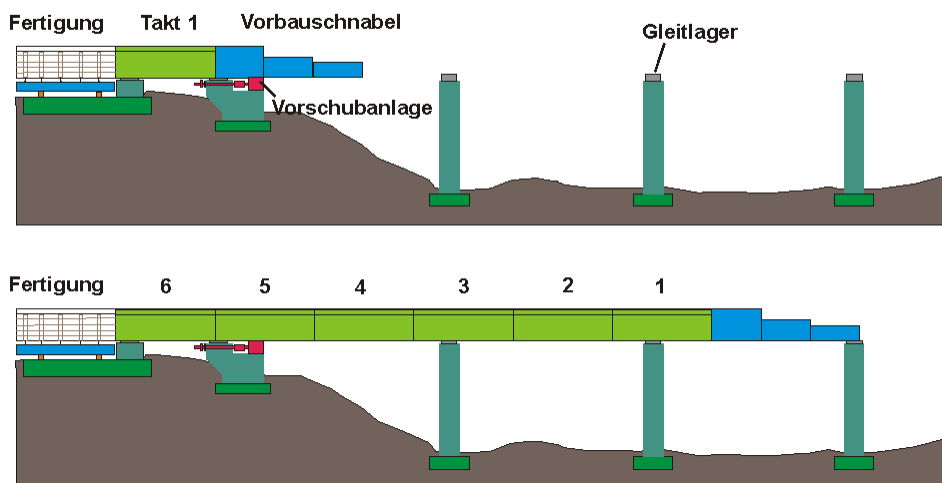


۳-۴- روش هل دادن

این روش که ابتدا توسط لئونارد و بار ابداع گردید عبارت است از ساخت عبورگاه پل به صورت مرحله ای و هل دادن تدریجی آن بر روی پایه ها، قطعات ۱۵ الی ۳۰ متری در محلی در تراز بالای پایه های پل ساخته شده و پس از اینکه مقاومت کافی کسب کردند برای مرحله حرکت پیش تنیده می گردند. وقتی قطعه ای به این ترتیب آماده گشت این قطعه بر روی پایه های پل به جلو رانده شده و ساخت قطعه بعدی آغاز می گردد. اگر دهانه بزرگتر از قطعه ساخته شده باشد در این صورت می توان از پایه های موقت استفاده کرد. در طرح قطعات باید به این نکته مهم توجه شود که این قطعات تحت تنش های معکوس حاصل از وزن خود قرار می گیرند چون با حرکت، هر قطعه از حالت کنسولی شروع شده و سپس بر روی دو تکیه گاه قرار گرفته و برای دهانه بعدی این مرحله تکرار می گردد. استفاده از این روش در صورتی مقدور است که عبورگاه انحنا نداشته باشد.



Taktschieben





۳-۵- روش بلند کردن و جابجا کردن

در این روش از جرثقیلهای پایه بلند استفاده می شود که با آن قطعات را از سطح زمین تا ارتفاع عبورگاه بلند کرده و در محل خواسته شده قرار می دهند.

