بسم الله الرحمن الرحيم

تاریخچه پیشرفت مهندسی پل
و
طبقه‌بندی سیستم سازه‌ای پلها

تهیه و تنظیم:
ش. طاحونی
ر. رادمـــان

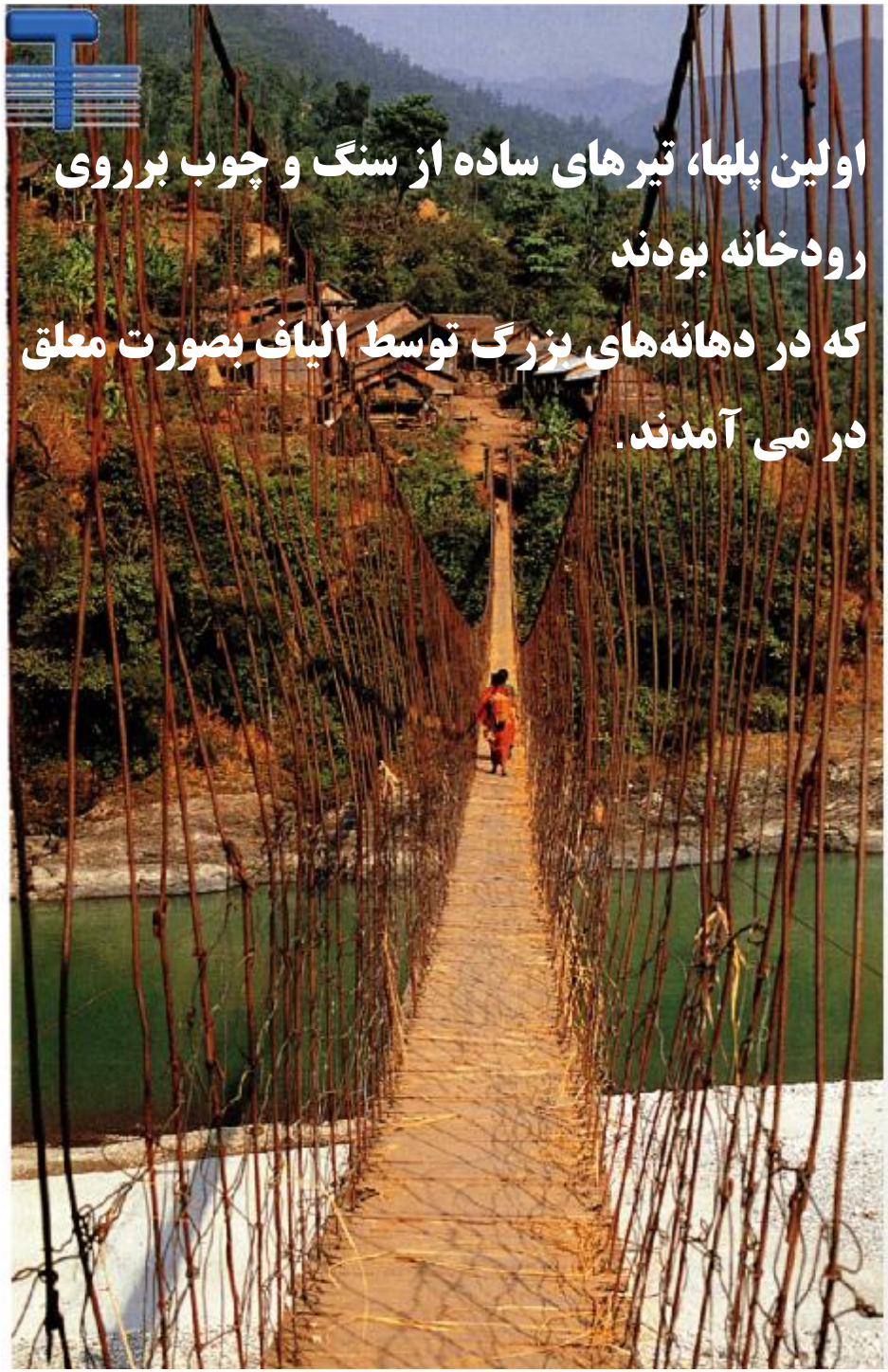
مهندسین مشاور تدبیرساحل پارس

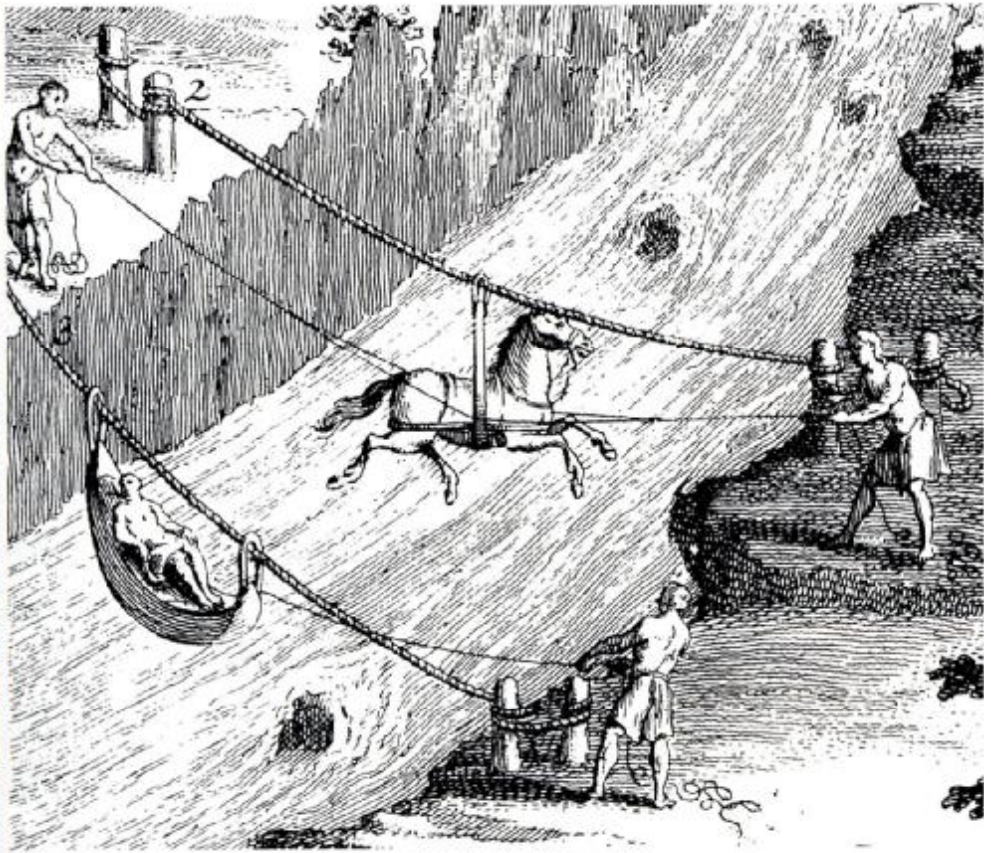
بخش اول

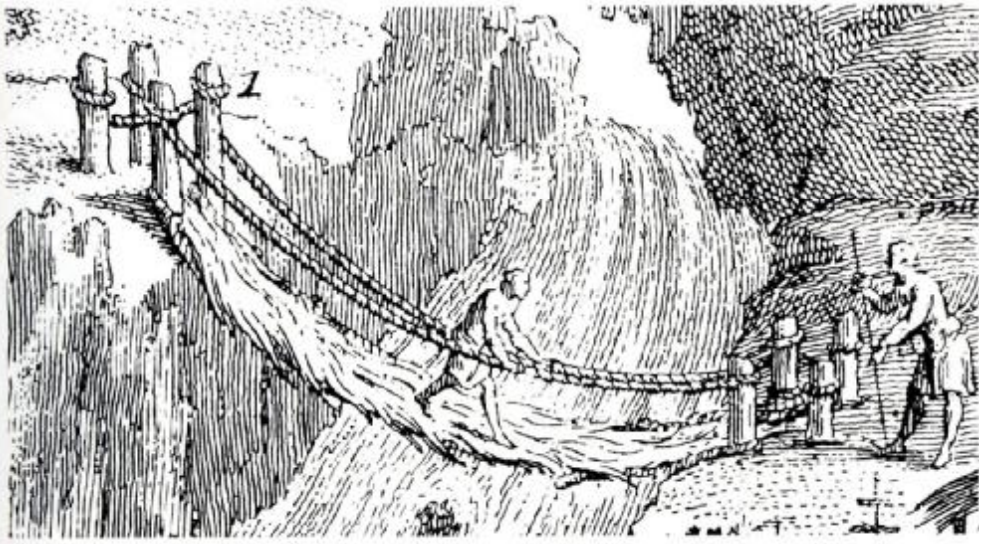
تاریخچه پیشرفت مهندسی پل

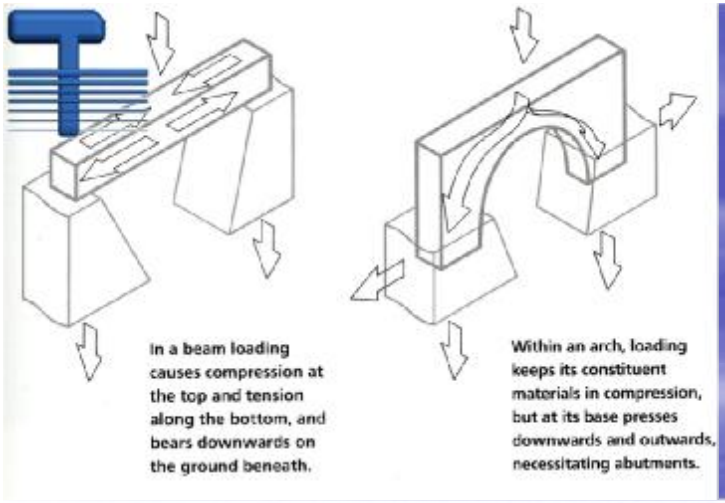
اولین پلها، تیرهای ساده از سنگ و چوب برروی رودخانه بودند

که در دهانه‌های بزرگ توسط الیاف بصورت معلق در می آمدند.







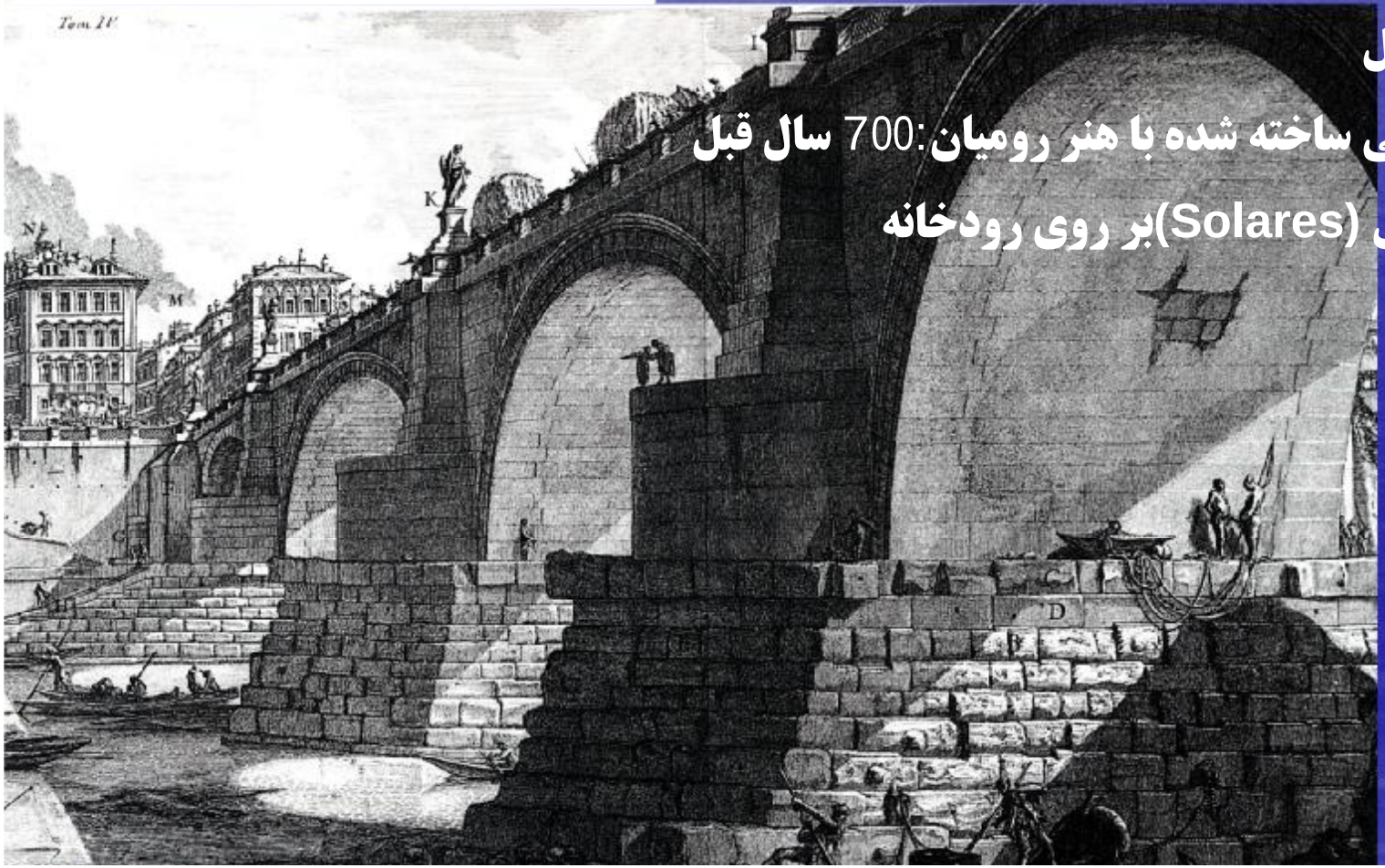


-بعنوان ردپای واقعی تاریخی پلها :پلهای طاقی یا قوسی(ARCH BRIDGE)

-اولین استفاده از طاق بعنوان پل در اسمیرنا ترکیه (900سال قبل از میلاد)

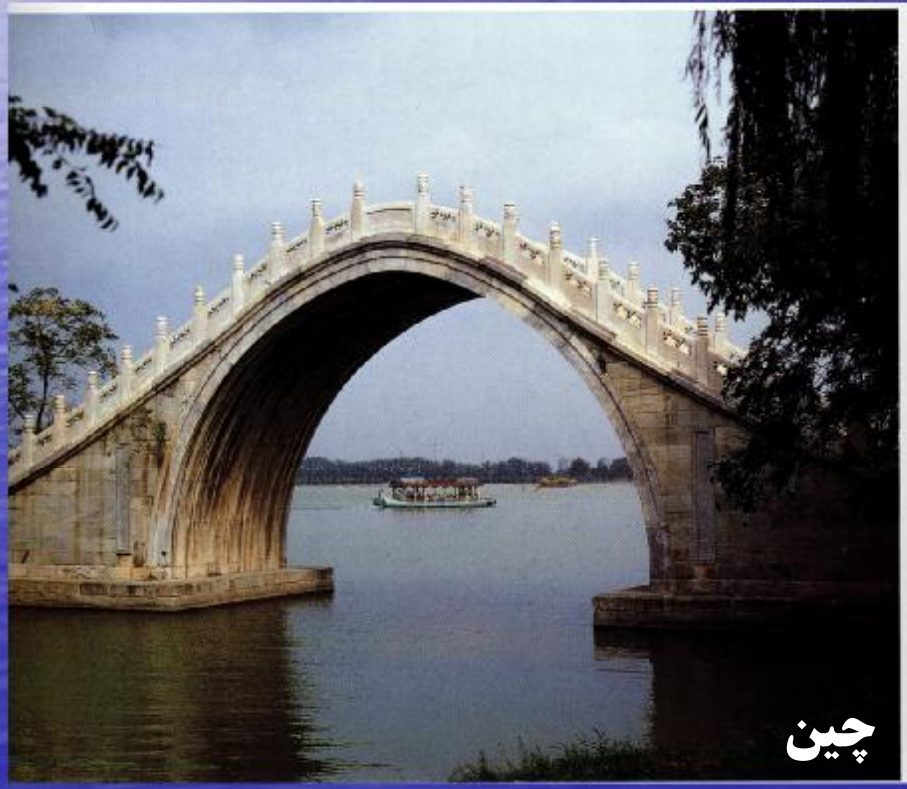
-در اروپا: رومی ها، پیشتاز استفاده از طاق سنگی بعنوان سازه باربر در ساختمان و پل

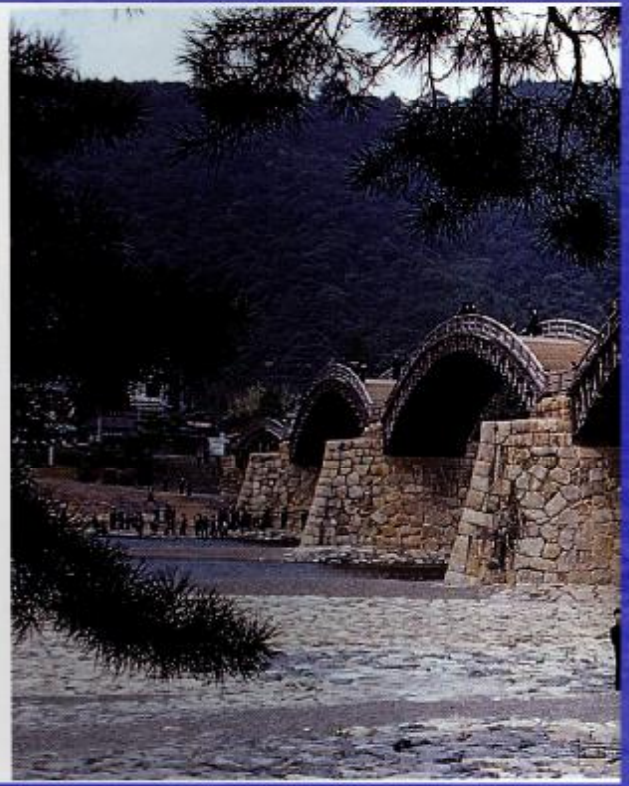
-اولین پل طاقی سنگی ساخته شده با هنر رومیان:700 سال قبل از میلاد / پل سولارس (Solares)بر روی رودخانه تورون(Teverone)



اسپانیا

فرانسه


چین



ایران: طاق زنی از هنرهای برجسته ایرانیان قبل و بعد از میلاد مسیح بوده است.

قدیمی ترین پل باقیمانده در ایران امروز : پل اورارتوها روی رودخانه ارس

از دوران هخامنشی دو بنا که ترکیبی از پل و سد هستند باقیمانده: یکی ساخته شده سنگ و خاک در شمالغربی تخت جمشید و دیگری بند دختر

ادامه ساخت بناهای ترکیبی پل و سد در دوران ساسانی (قرن3تا7)، بویژه در مناطق باتلاقی و سیلابی: نمونه بارز آن پل والرین (بند قیصر) در شوشتر

بند قیصر

در پلهای ساسانی تعدادی قطعات سنگی با بستهای آهنی و سربی به یکدیگر پیوند می یافتند.

بسیاری از پلهای ساسانی بتدریج ویران شده‌اند و بعدها در دوره اسلامی تعمیر شده‌اند.

(پایه های دوران ساسانی + بخشهای فوقانی در دوره اسلامی)

پل دختر

(شمالغربی اندیمشک)

پلهای عمده دوران اسلامی:

- پل خداآفرین (روی رودخانه ارس در شمال آذربایجان) - نخستین پل بزرگ دوره اسلامی

- پل ضیاء الملک در رودخانه‌ای نزدیک کرخه / قرن 8
- پل واقع در توس خراسان / منسوب به دختر فردوسی

- پل روی رودخانه قزل اوزن در جنوب میانه / قوسی / اواخر قرن9
- پل گرگان / قرن7
- پل بین مراغه و زنجان / دوره مغول
- پل قافلانکوه : ابتدا ساخته شده در قرن 5 / تعمیر توسط شاه عباس اول /تعمیر دوم قرن11/ در سال1326 دهانه میانی توسط نیروهای فرقه دموکرات منفجر شد

پل قافلانکوه

دوران صفوی : دوران شکوفایی معماری اسلامی

- پل الله وردی خان (سی و سه پل) بر روی زاینده رود اصفهان / زمان شاه عباس اول

-پل خواجو بر روی زاینده رود اصفهان /زمان شاه عباس دوم /

ترکیبی از بند انحرافی و پل

-طول کلی پل: 132 متر

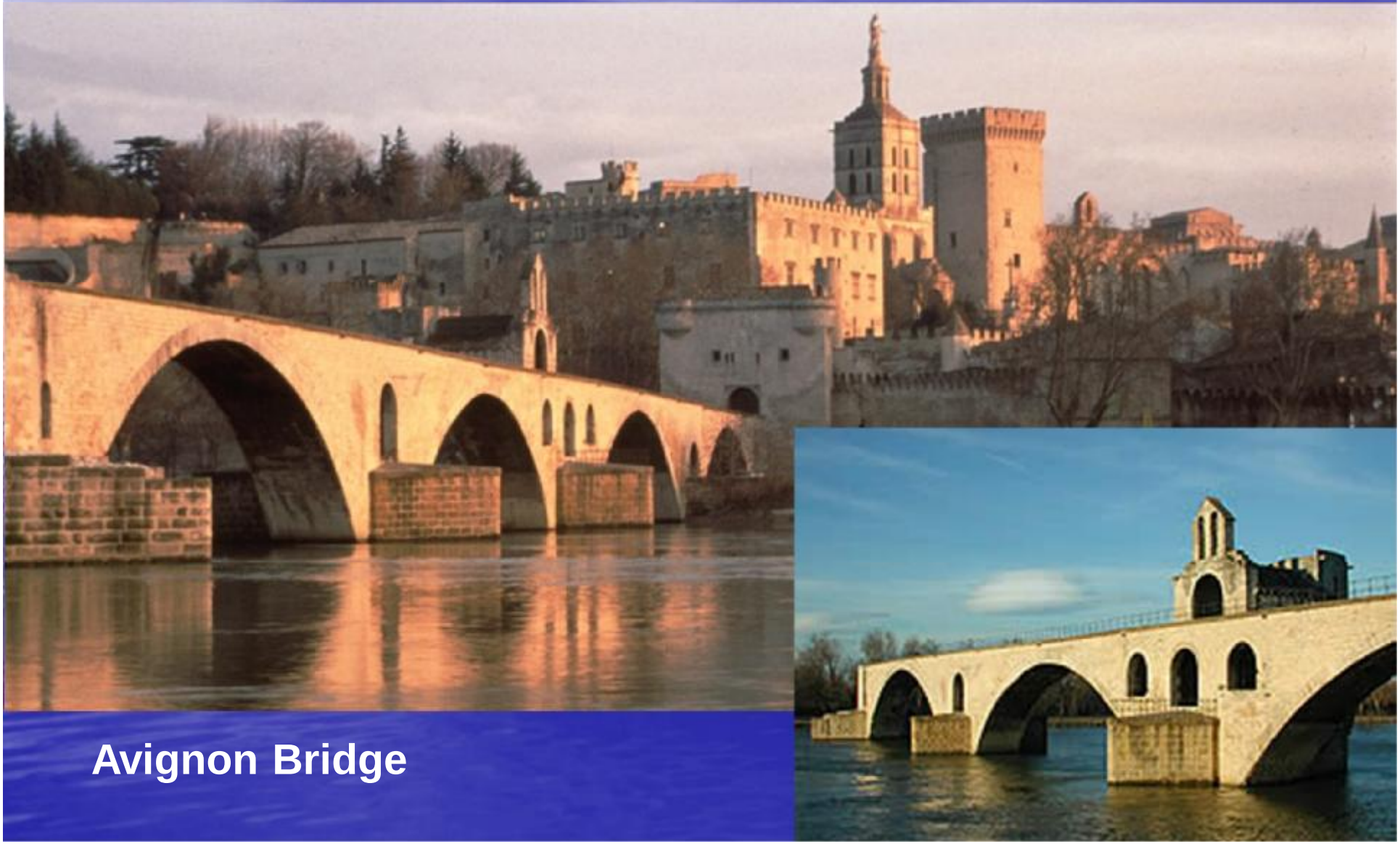
ضخامت طاق پل: 1/25متر

-ضخامت پایه‌ها:1/6 تا 1/93

21دهانه : 4/2 تا 5/2 متر

-شکوفایی مجدد هنر پلسازی در اروپا بعد از سالهای سیاه در قرن دوازده بعد از میلاد

* پل سه دهانه طاقی سنگی اویگنان / فرانسه / هر دهانه 33متر



Avignon Bridge

شروع قرن 19 / شناخت از مقاومت کششی چدن : ساخت طاقها و خرپاهای چدنی یا ترکیبی از چوب و چدن

ساخت لوکوموتیوهای بخاری : شروع ساخت پلهای راه‌آهن

مشهورترین پل سازان این دوران:

John Rennie

Thomas Telford

George Stephenson

اولین پل چدنی در کلبروک دیل انگلستان / یک قوس نیم دایره 42متر

Abraham Darby

Coalbrookdale Bridge

John Wilkinson

- اروپاییان بنیانگذار پلهای طاقی مدرن
- افتخار ساخت پلهای خرپایی (چدنی - چوبی) برای آمریکایی ها
- از اولین پلهای خرپایی مشهور: پل فیرمانت Fairmount Bridge در پنسیلوانیا که در 1838 در اثر آتش سوزی از بین رفت

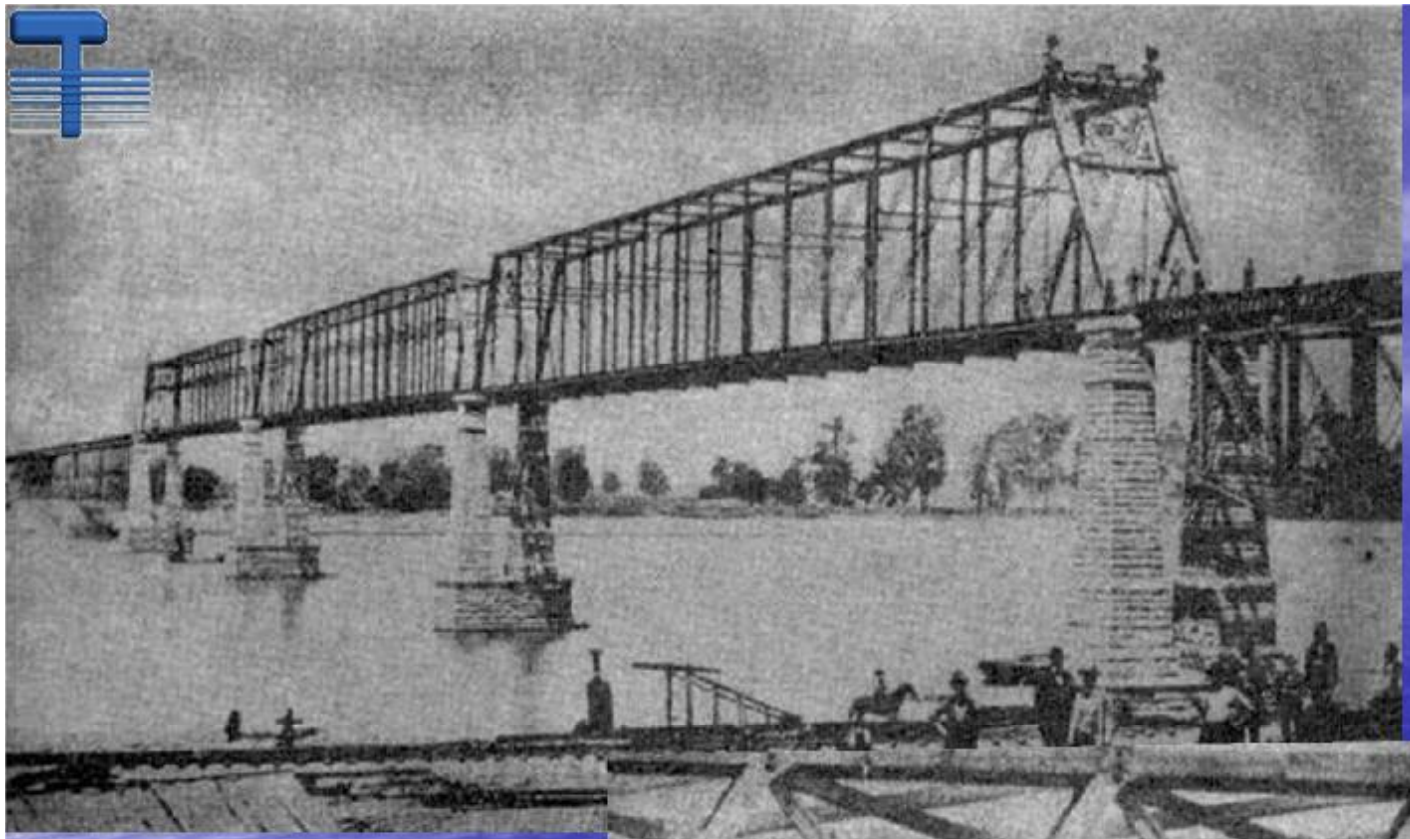
Squire Whipple

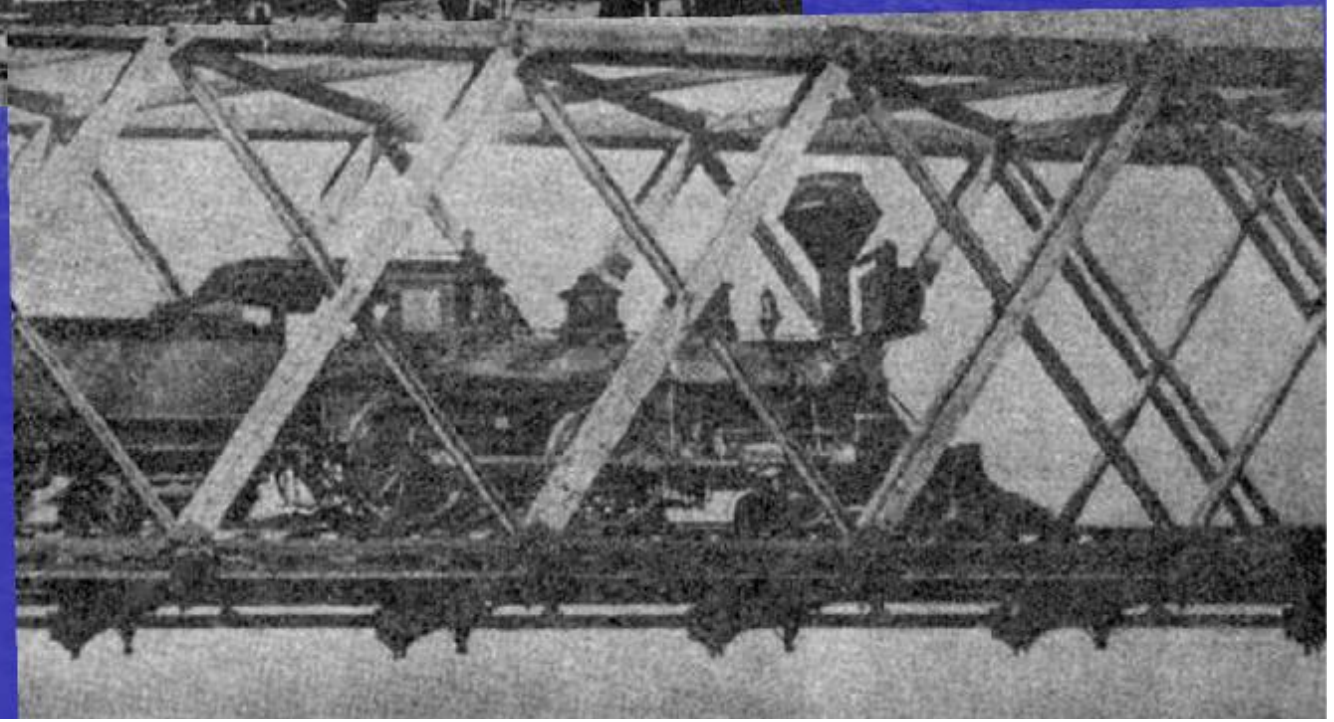
-اولین کتاب پل در 1847 توسط ویپل منتشر شد

-در سال 1858 جی.ام.رانکین کتاب مکانیک کاربردی را منتشر کرد و 50سال کتاب مقدس طراحان پل بود.

- تخریب بسیاری از پلهای خرپایی بدلیل عدم شناخت مکانیک مصالح، تحلیل سازه ها و نیروهای وارده

نمونه پلهای خرپایی اولیه





درکنارپلهای خرپایی، پلهای معلق هم مورد استفاده قرار میگرفتند.

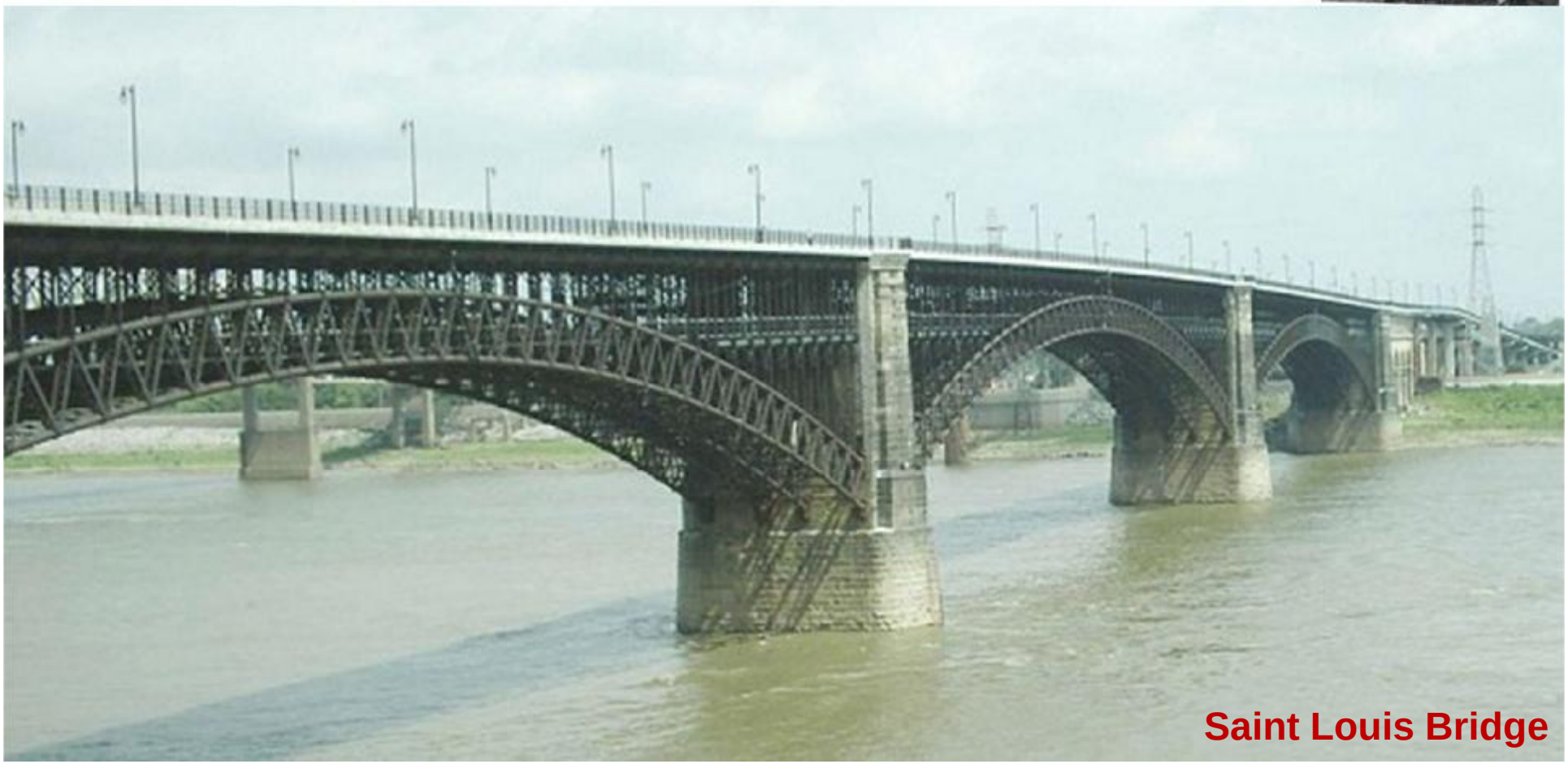
- پل معلق kettenbruch در بوداپست / طرح و ساخت توسط مهندس انگلیسی: ترینی کلارک دهانه مرکزی 202متر / بین سالهای 1839 - 1845

John Roebling

-پل معلق آبشار نیاگارا/بین سالهای 1851 - 1855 /
دهانه 250 متر /

معروفترین پل‌ساز آمریکایی این دوره James B.Aids
پل سنت لوییس روی رودخانه می سی سی پی / 3دهانه151 - 157 - 151متر
ساخت پل :5سال اتمام:1874 تعمیر دال بتنی با بتن سبک: سال1947

EADS BRIDGE, ST. LOUIS



Saint Louis Bridge

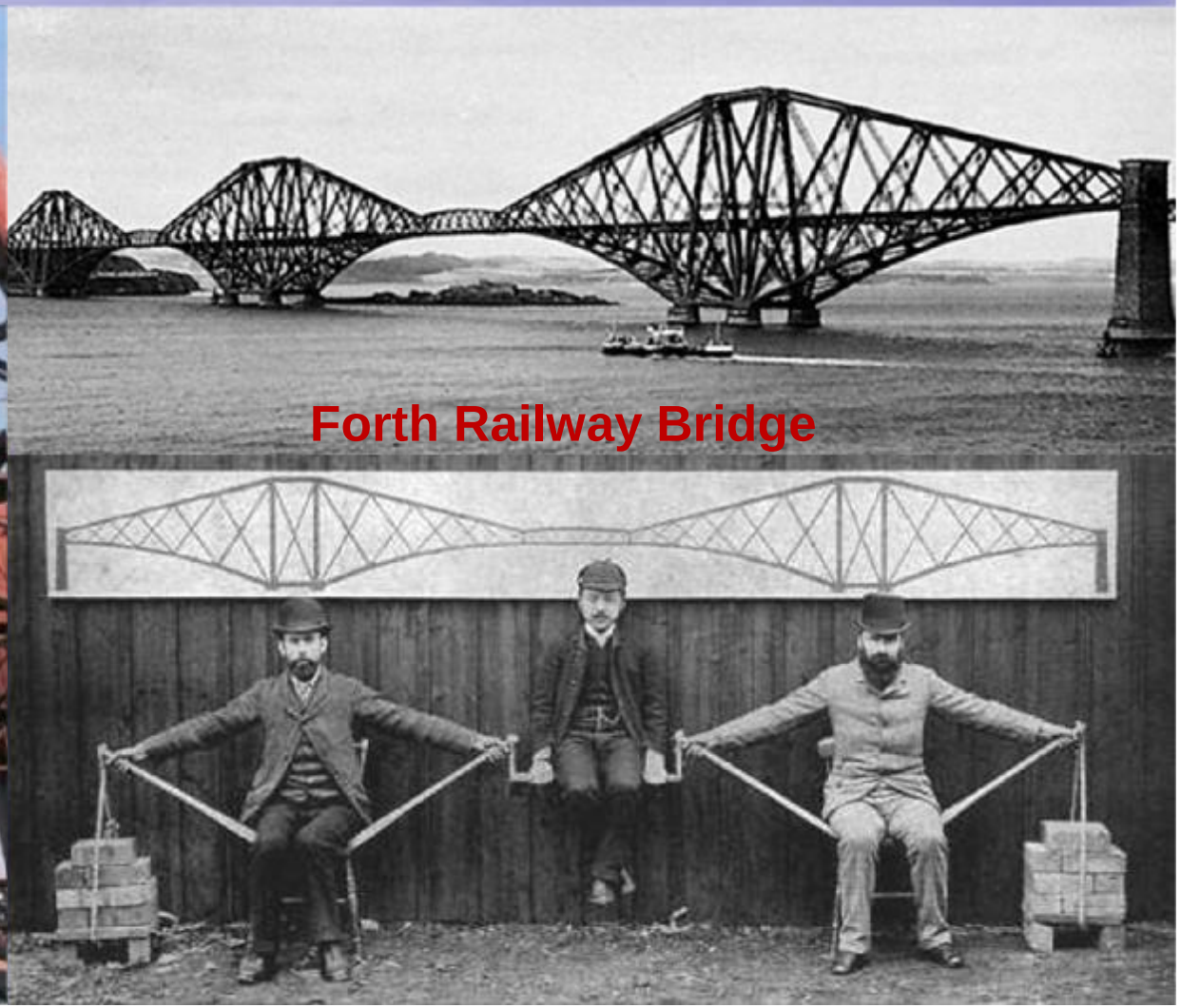
همزمان با پل سنت لوییس،
آغاز ساخت پل بروکلین در
نیویورک توسط
John Roebling

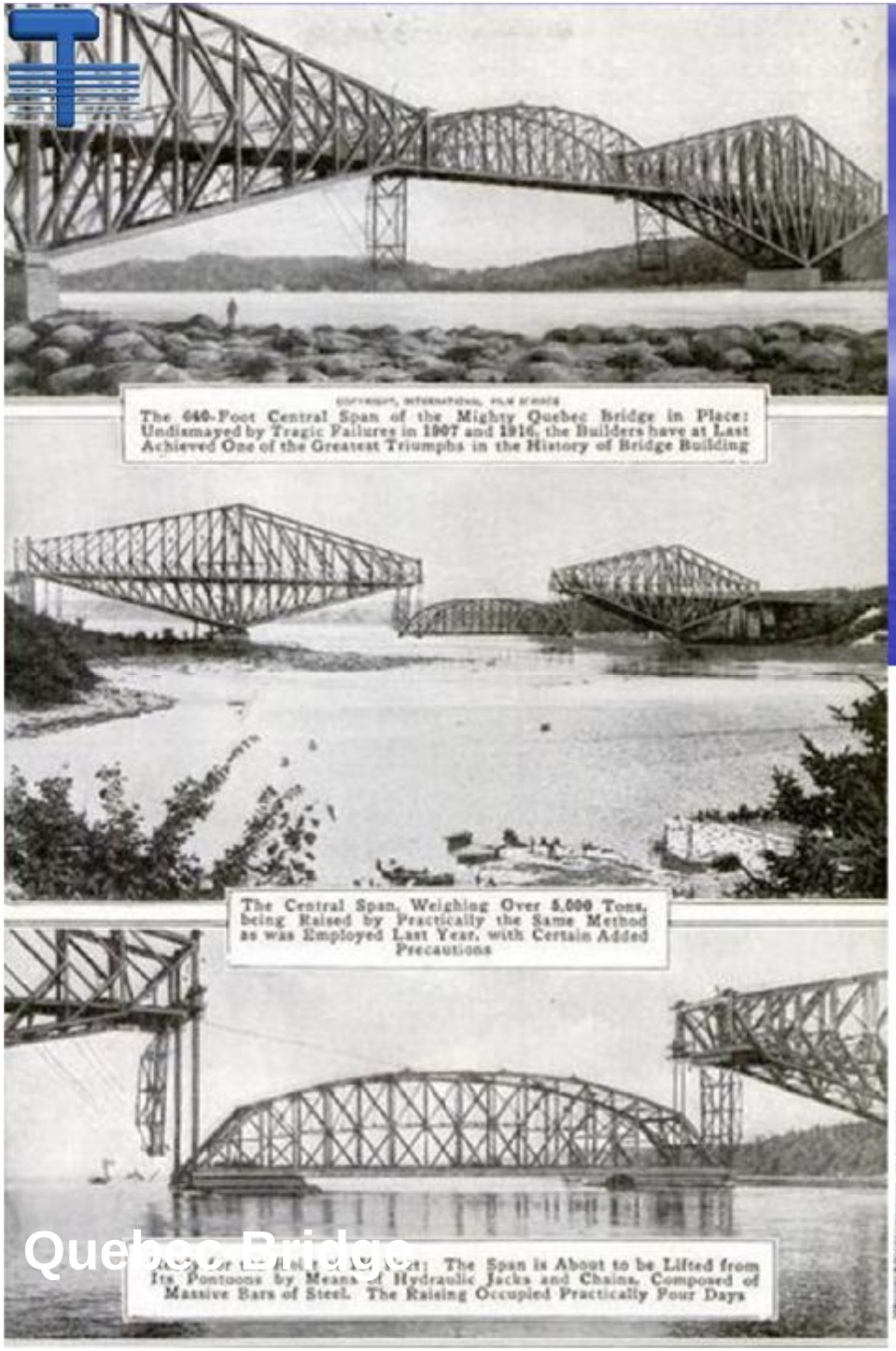
پایان کار توسط پسرش در 1883 با
هزینه 9میلیون ریال .
این پل با دهانه488متر، دهانه‌اش
50درصد بیش از بزرگترین دهانه
موجود تا آن دوران بود.

Brooklyn Bridge

بزرگترین دهانه باقیمانده از پلهای بزرگ این دوره، پل راه آهن در اسکاتلند است.

خرپای طره‌ای / دودهانه518متر / ارتفاع خرپای پل در روی تکیه‌گاه107متر / استفاده از نیمرخهای لوله با قطر حدود 3/6متر





حادثه بد این دوره خرابی پل کبک

در 1907 با طرح تئودر کوپر

*** حادثه اول هنگام اتمام بازوی چپ/درگذشت**

75کارگر/خرابی به علت کمانش اعضای فشاری

بعلت فقدان مهاربندی لازم

*** حادثه دوم، چندسال بعد هنگام نصب دهانه معلق**

میانی توسط بارجهای شناور

•نهایتا ساخت پس از 2/5سال و سالها رکورددار

دهانه خرپایی طره‌ای

(549متر)

شروع قرن بیستم: پیشرفت صنعت/رونق ماشینهای سبک و سنگین: ساخت پلهای جاده‌ای

Robert Mailart

* ساخت چندین پل طاقی بتنی زیبا در سوییس توسط رابرت می لارت

* سال1931 - ساخت پل معلق جرج واشنگتن با دهانه 1067متر بر روی رودخانه هودسون در نیویورک توسط O.H. Ammann

O.H. Ammann

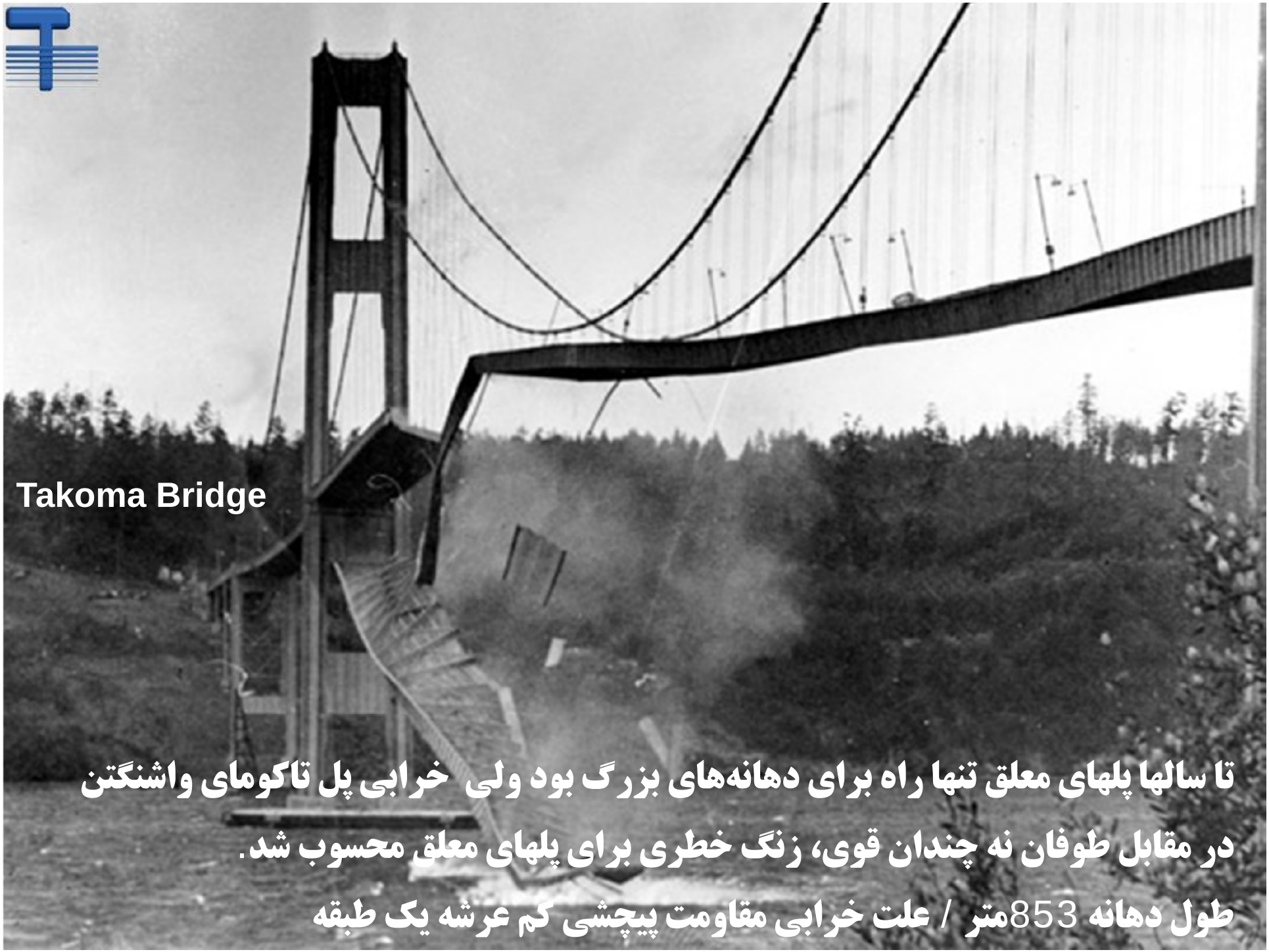
George Washangton Bridge

همچنین:

1931: پل قوسی کیل وان کول در نیوجرسی برای عبور ماشین با دهانه 503/5متر

1932:پل بندر سیدنی برای عبور قطار با دهانه 503متر

1937: پل معلق گولدن گیت در کالیفرنیا /
دهانه 1280 متر / ارتفاع برج آن 227متر
/ قطر کابل اصلی 103سانتیمتر
Golden gate Bridge



تا سالها پلهای معلق تنها راه برای دهانه‌های بزرگ بود ولی خرابی پل تاکومای واشنگتن در مقابل طوفان نه چندان قوی، زنگ خطری برای پلهای معلق محسوب شد.

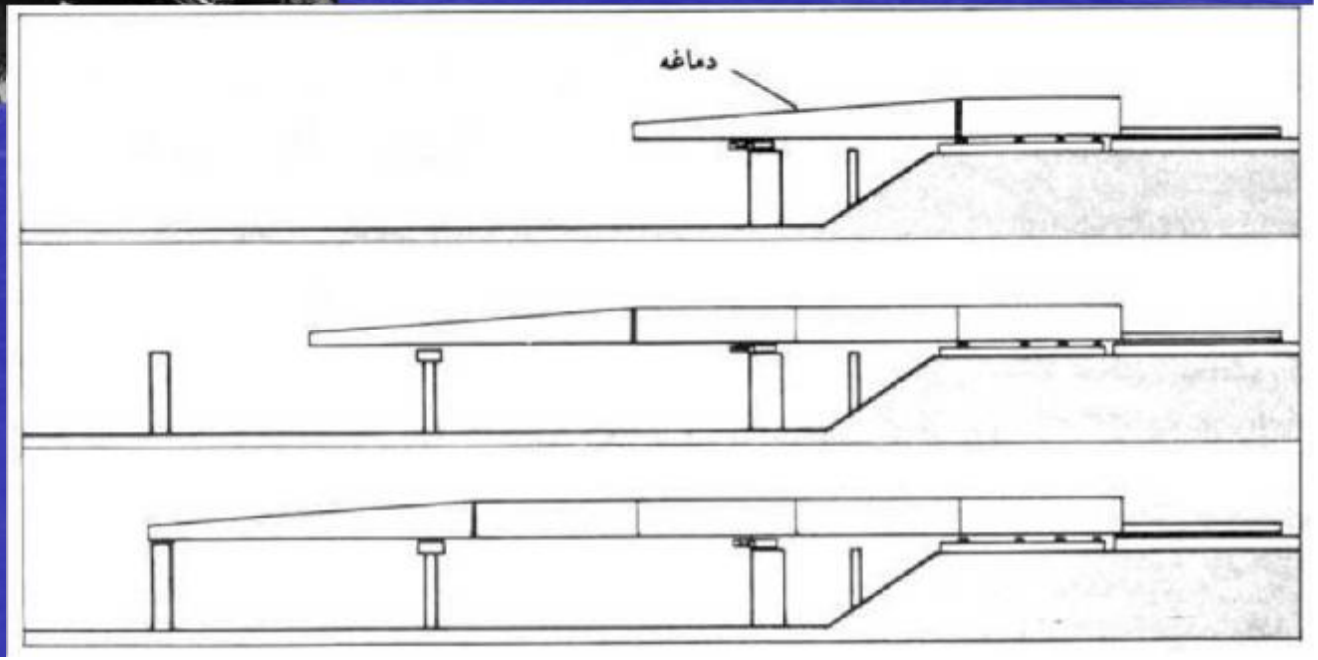
طول دهانه 853متر / علت خرابی مقاومت پیچشی کم عرشه یک طبقه

در جنگ جهانی دوم، ساخت پلهای نظامی با سرعت زیاد نصب و جمع آوری رونق گرفت.

معروفترین: Bailey Bridge

/ پانلهای خرپایی بطول 3متر و ارتفاع 1متر

/ اجرا به روش هل دادن از یک طرف ساحل



در دوران جنگ جهانی دوم، در کشورهای دوراز جنگ پلهای دیگری ساخته شد.

-پل طاقی بتن مسلح ساندو در سوئد / دهانه 264متر

-سال1963: پل طاقی بتنی مسلح گلادزویل در بندر سیدنی / دهانه 305متر

بعد از جنگ جهانی دوم، آغاز پیشرفت در پلسازی با پیش‌تنیدگی

در سال 1957 پل 40 کیلومتری روی دریاچه pontchartrain در نیواورلان آمریکا

هردهانه 17متر و عرض 10متردر یک کارگاه شناور بطور یکپارچه بتن‌ریزی شده و در جای خود نصب شد.

* سالهای 1960تا1970: شکوفایی اجرای طره‌ای در پلهای پیش‌تنیده

رکورد دهانه 240متر اجرای دهانه‌های یکسره

* از پیشرفتهای این دوره: گسترش پلهای ارتوتروپیک در اروپا و آمریکا

اولین نوع این پلها در مانهایم آلمان در سال1950

این پلها حدود 40درصد سبکتر از پلهای مشابه با کف بتنی هستند

* از دیگر پیشرفتهای این دوره: استفاده از آلومینیوم، پیچهای پرمقاومت پیش‌تنیده و جوشکاری در پلسازی (جایگزین پرچ)

1965:**شکست رکورد پل گلدن گیت با ساخت پل**

verrazano در نیویورک با دهانه1300**متر /هزینه**

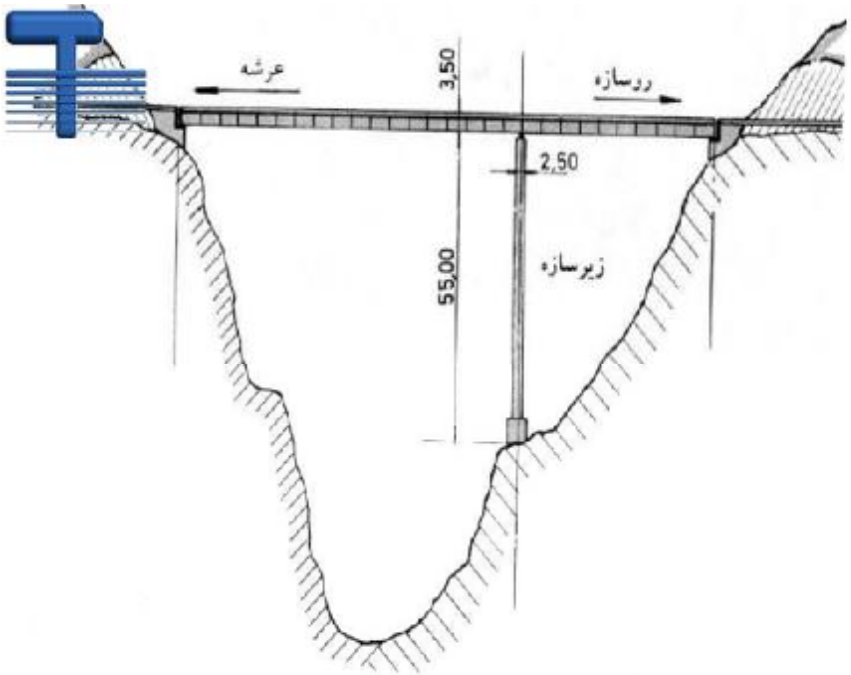
پل 325**میلیون دلار / طراح O.H. Ammann**

از پیشرفتهای دیگر: ابداع پلهای با کابل کشیده(ترکه‌ای) cable stayed bridge
اولین نوع این پلها در دوسلدورف آلمان – 260متر
شاخص ترین آنها Millau

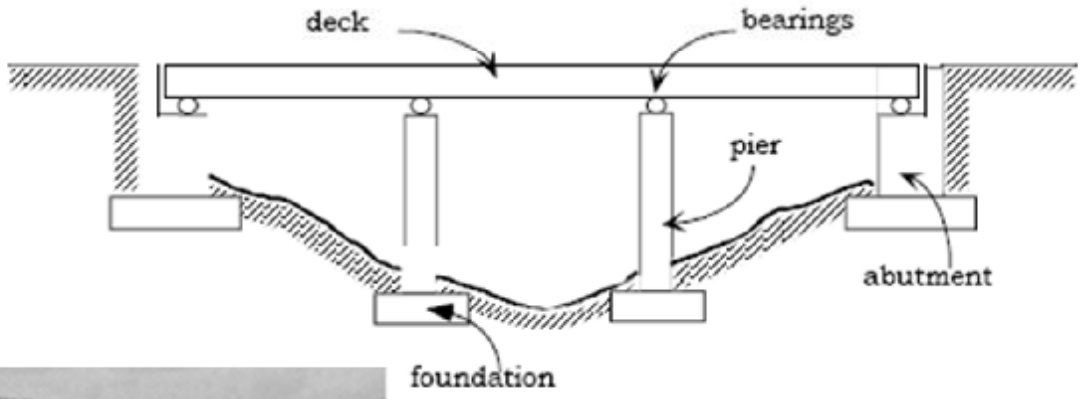
بخش دوم:

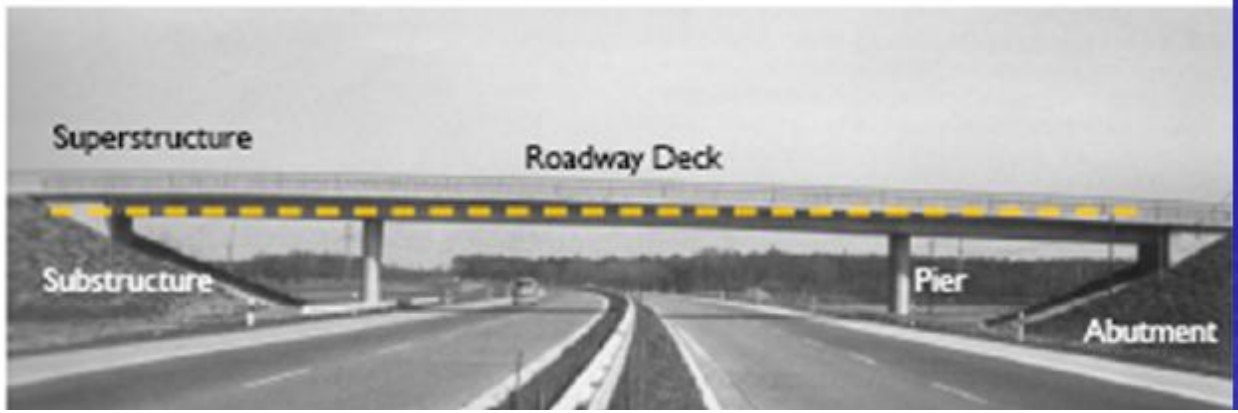
طبقه‌بندی سیستم سازه‌ای

عرشه پلها(روسازه پلها)



- Substructure
  - Foundation (Pile/ Spread Footing)
  - Pier (Column)
  - Abutment
- Superstructure
  - Any structures above bearing which support the roadway
  - Wearing Surface





اجـــزای پـــل

- روسازه

(SUPER STRUCTURE)

- زیرسازه

(SUPER STRUCTURE)

* طبقه بندی پلها از نقطه نظر طول دهانه

1 - دهانه‌های کوتاه (زیر 8 متر)

2 - دهانه‌های متوسط (بین 8 تا 60متر)

3 - دهانه‌های بلند (بزرگتر از 60متر)

* طبقه بندی پلها از نقطه نظر سیستم سازه‌ای

1 - پلهای صفحه‌ای (از بتن مسلح)

2 - پلهای تیر و شاهتیر

3 - پلهای خرپایی

4 - پلهای قوسی(طاقی)

5 - پلهای خرپایی طره‌ای

6 - پلهای معلق (با کابل سهمی)

7 - پلهای با کابل کشیده (پل ترکه‌ای)

8 - پلهای قابی

* طبقه بندی پلها از نقطه نظر مصالح

1 - پلها با مصالح بنایی و بتن غیرمسلح

2 - پلهای بتن مسلح (درجا و پیش ساخته)

3 - پلهای بتن پیش تنیده (پیش کشیده و پس کشیده)

4 - پلهای فولادی

5 - پلهای مرکب فولاد و بتن

6 - پلهای آلومینیومی

* طبقه بندی پلها از نقطه نظر شیوه ساخت

1 - اجرای درجا با قالب بندی کامل

2 - اجرای پیش ساخته : الف. ساخت با جرثقیل ب.نصب به شیوه هل دادن

3 - اجرای طره‌ای

* طبقه بندی پلها از نقطه نظر کاربری

1 - پلهای عابر پیاده

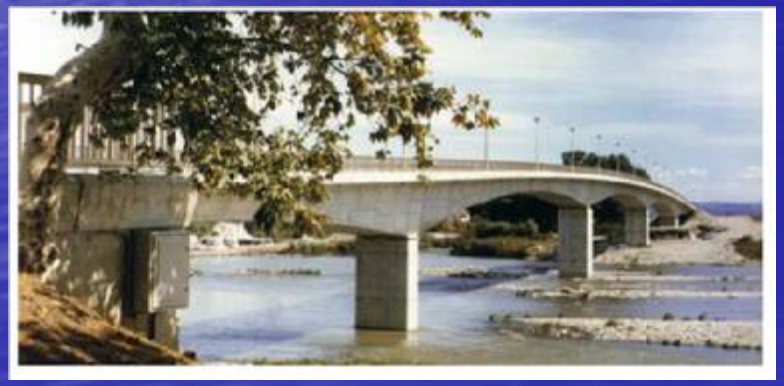
2 - پلهای جاده

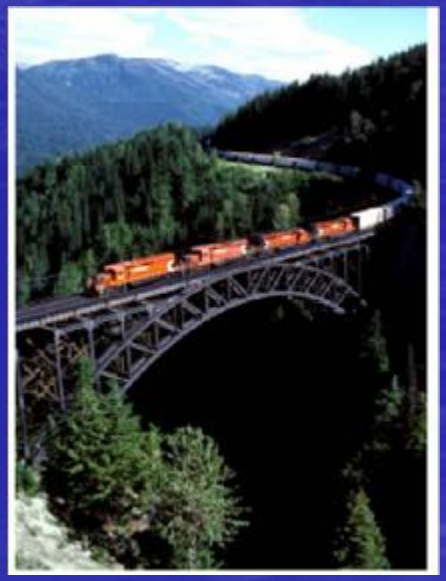
3 - پلهای راه‌آهن

4 - پلهای رودخانه‌ای

5 - پلهای روگذر - زیرگذر شاهراه‌ها

6 - پلهای عبور خط لوله آب، نفت، گاز وغیره





* طبقه بندی پلها از نقطه نظر سیستم باربری عرشه

•سیستم پل از لحاظ باربری ó دهانه پل

1 - پلهای دهانه کوتاه ومتوسط (تا دهانه 100متر)

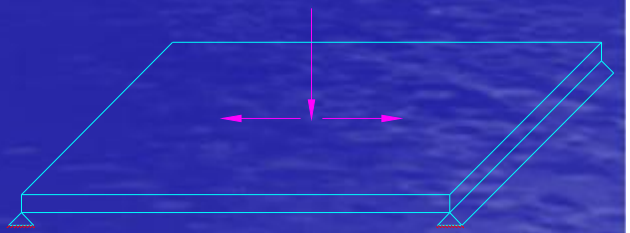
2 - پلهای دهانه بزرگ

* پلهای دهانه کوتاه ومتوسط

1 - عرشه یک عنصری

عموما دال بتن مسلح یکطرفه

در دو انتها متکی روی تکیه گاه

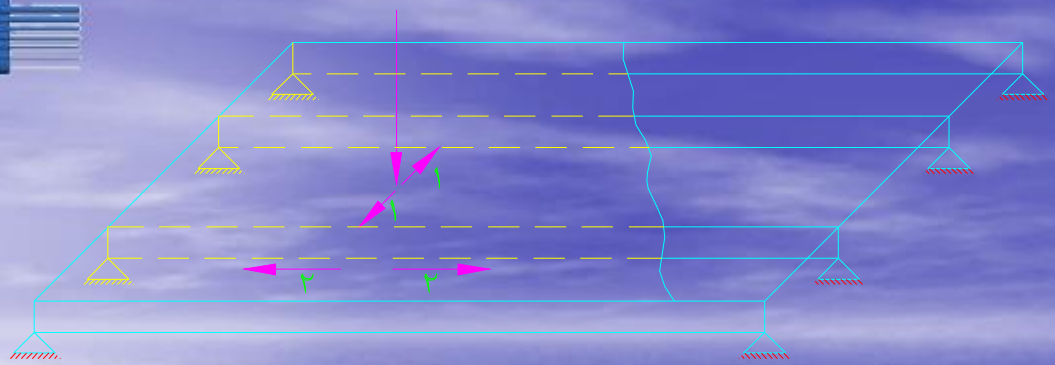


دهانه اقتصادی: ساده تا 7متر - یکسره تا 14متر

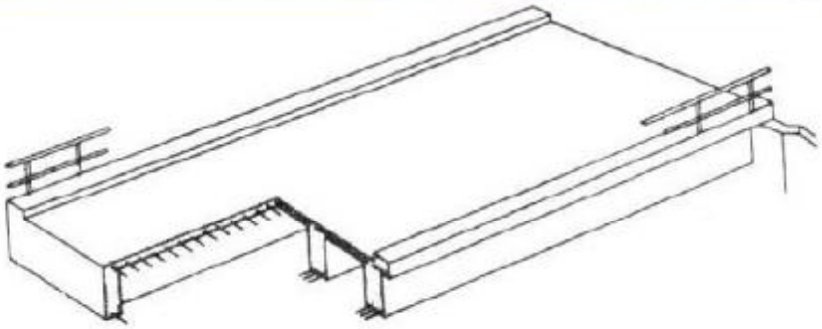
2 - عرشه دو عنصری

تیرهای حمال + دال بتن مسلح یا فولادی

دهانه اقتصادی: 10 تا 60متر



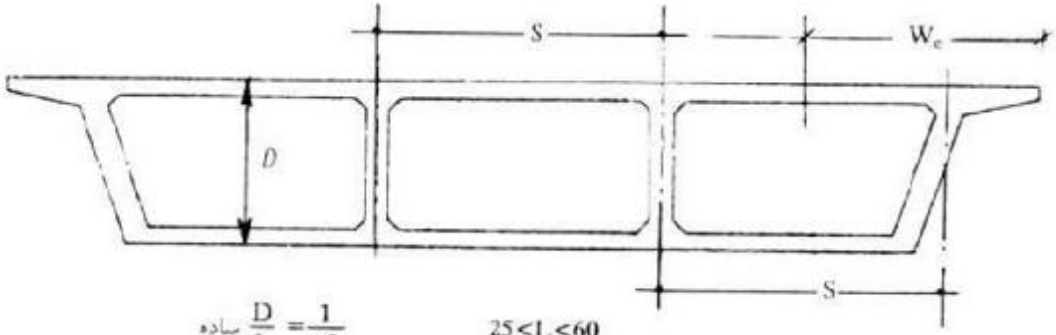
عرشه دوعنصری با تیرهای طولی T بتنی



دهانه ساده $7.5\ m < L < 30\ m$ ، $\frac{D}{L} = \frac{1}{14}$ تا $\frac{1}{11}$

دهانه یکسره $7.5\ m < L < 30\ m$ ، $\frac{D}{L} = \frac{1}{15}$ تا $\frac{1}{14}$

عرشه دوعنصری با تیرهای طولی جعبه‌ای بتن مسلح

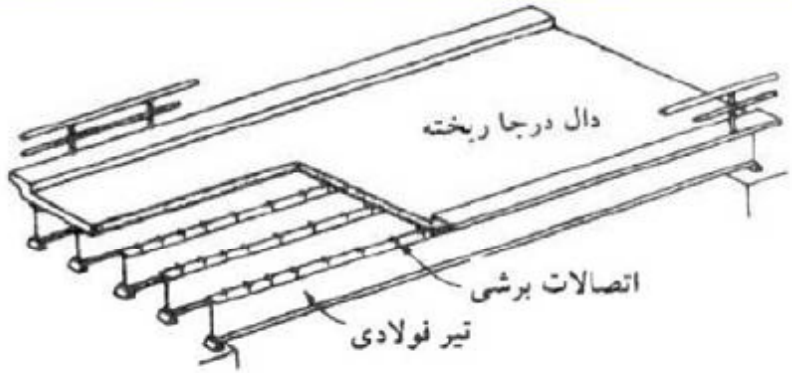


ساده $\frac{D}{L} = \frac{1}{15}$ $25 < L < 60$

L = دهانهٔ متعارف

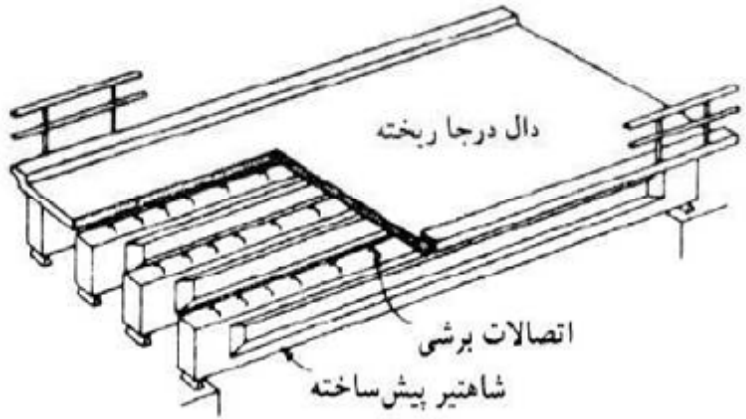
یکسره $\frac{D}{L} = \frac{1}{18}$

عرشه دوعنصری با تیرهای طولی فولادی



دهانه و نسبت $\frac{D}{L}$ معمول $18\ m < L < 30\ m$ ، $\frac{D}{L} = \frac{1}{16} \sim \frac{1}{20}$

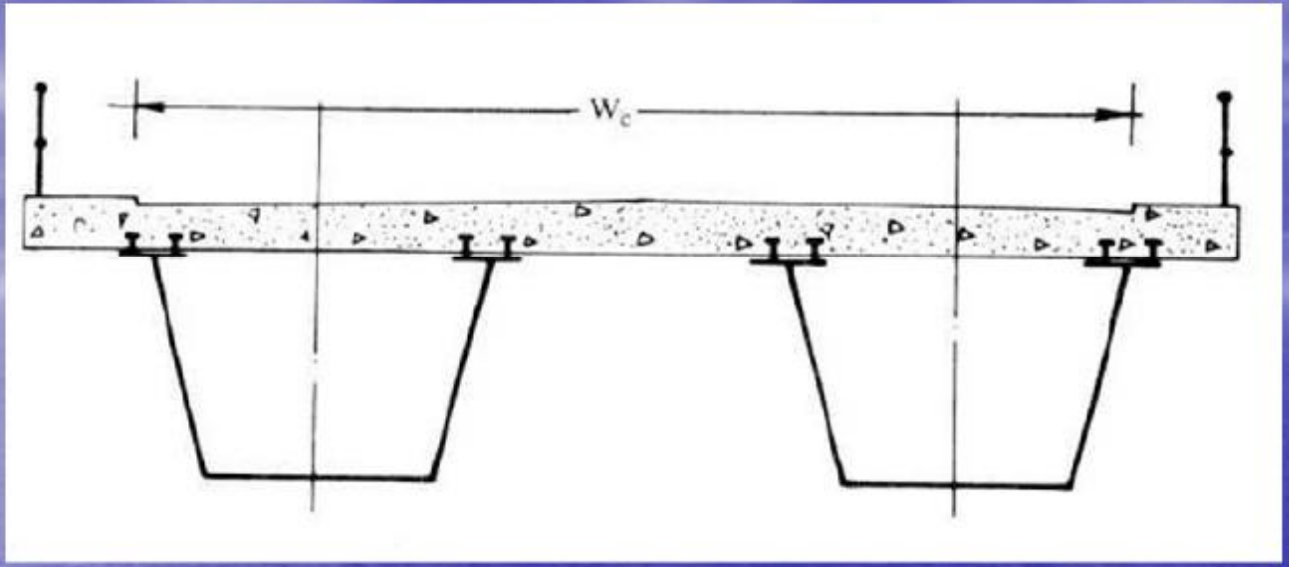
عرشه دوعنصری با تیرهای طولی پیش تنیده



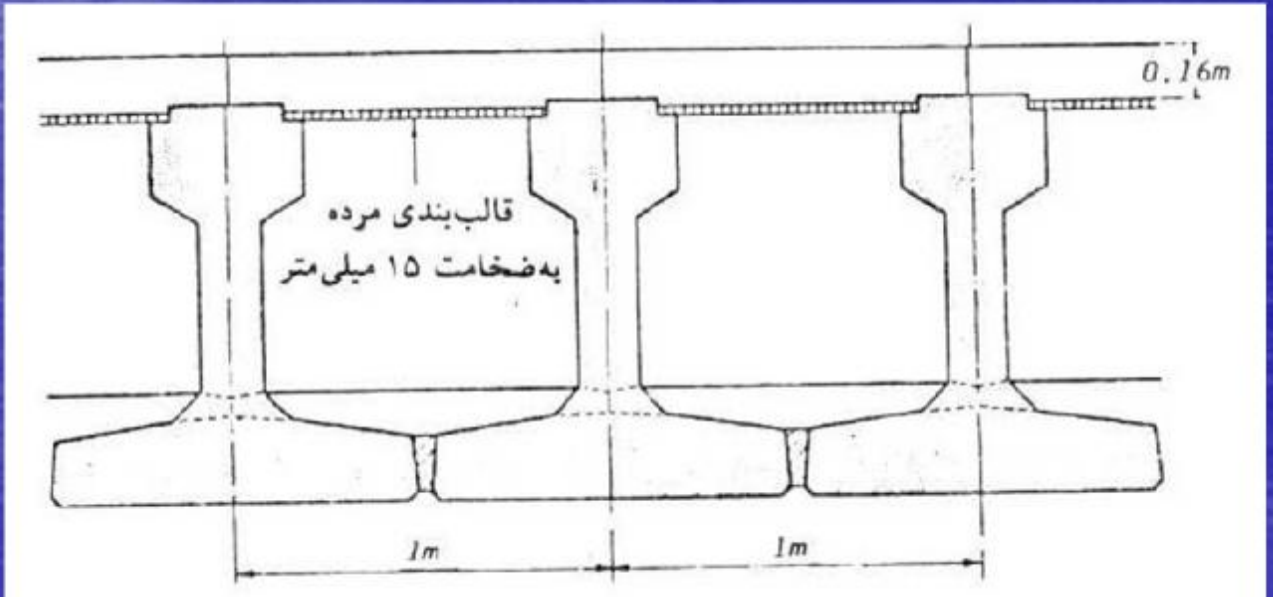
تیر پیش تنیده $\frac{D}{L} = \frac{1}{16} \sim \frac{1}{18}$

فاصلهٔ معمول تیرهای I $= 2.1 \sim 2.7\ m$

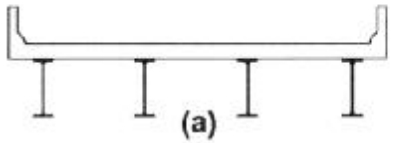
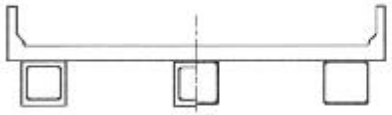
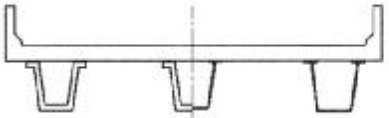
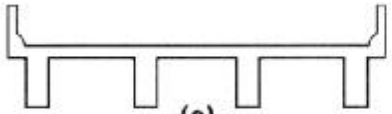
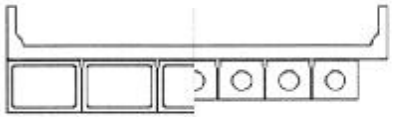
عرشه دو عنصری با تیرهای طولی جعبه‌ای فولادی



عرشه دو عنصری با تیرهای طولی پیش ساخته پیش تنیده پهلو به پهلو



سیستمهای متداول عرشه های دو عنصری

Supporting Components	Type Of Deck	Typical Cross-Section
Steel Beam	Cast-in-place concrete slab, precast concrete slab, steel grid, glued/spiked panels, stressed wood	 (a)
Closed Steel or Precast Concrete Boxes	Cast-in-place concrete slab	 (b)
Open Steel or Precast Concrete Boxes	Cast-in-place concrete slab, precast concrete deck slab	 (c)
Cast-in-Place Concrete Multicell Box	Monolithic concrete	(d)
Cast-in-Place Concrete Tee Beam	Monolithic concrete	 (e)
Precast Solid, Voided or Cellular Concrete Boxes with Shear Keys	Cast-in-place concrete overlay	 (f)
Precast Solid, Voided, or Cellular Concrete Box with Shear Keys and with or without Transverse Post-Tensioning	Integral concrete	(g)

18 m < L < 30 m

D/L= 1/20 ~ 1/16

7.5 m < L < 30 m

SIMPLE: D/L= 1/14 ~ 1/11

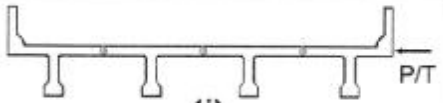
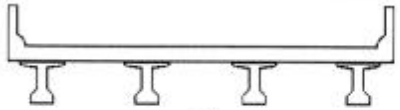
CON.: D/L= 1/15 ~ 1/14

7.5 m < L < 30 m

SIMPLE: D/L= 1/14 ~ 1/11

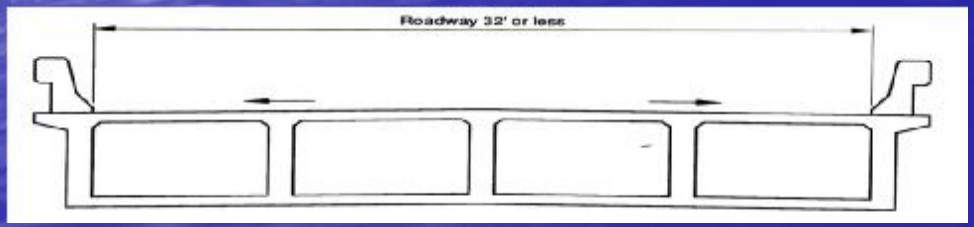
CON.: D/L= 1/15 ~ 1/14

سیستمهای متداول عرشه های دو عنصری (ادامه)

Supporting Components	Type Of Deck	Typical Cross-Section
Precast Concrete Channel Sections with Shear Keys	Cast-in-place concrete overlay	(h)
Precast Concrete Double Tee Section with Shear Keys and with or without Transverse Post-Tensioning	Integral concrete	P/T (i)
Precast Concrete Tee Section with Shear Keys and with or without Transverse Post-Tensioning	Integral concrete	 P/T (j)
Precast Concrete I or Bulb-Tee Sections	Cast-in-place concrete, precast concrete	 (k)

7.5 m < L < 30 m

D/L= 1/18 ~ 1/16

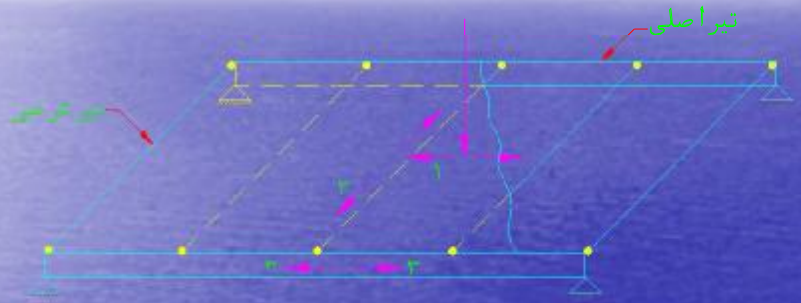


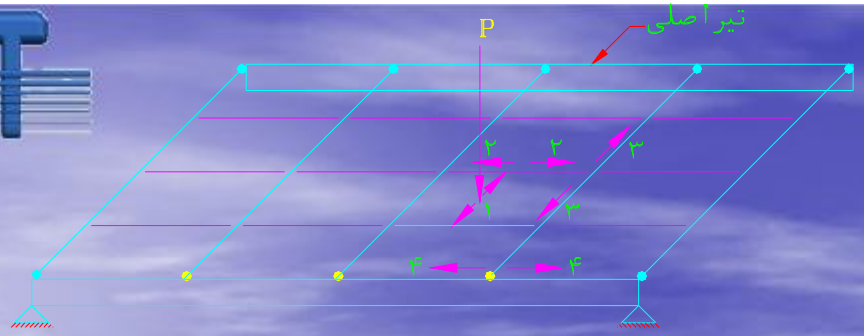
7.5 m < L < 30 m

D/L= 1/18 ~ 1/16

3 - عرشه سه عنصری

دو تیر اصلی + تیرهای عرضی(تیرکف) +دال بتن مسلح یا فولادی





4 - عرشه چهار عنصری

دو تیر اصلی + تیرهای عرضی (تیر کف)

+ تیرچه های طولی + دال بتن مسلح یا فولادی

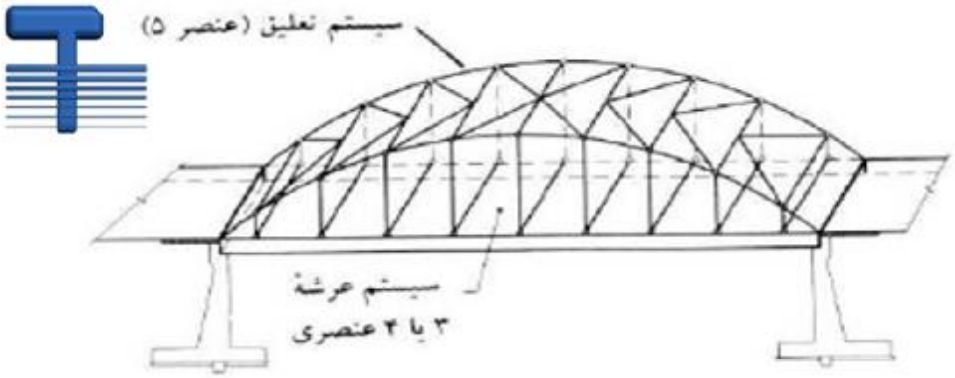
۵– عرشه با سیستمهای خاص

۵–۱– عرشه های معلق

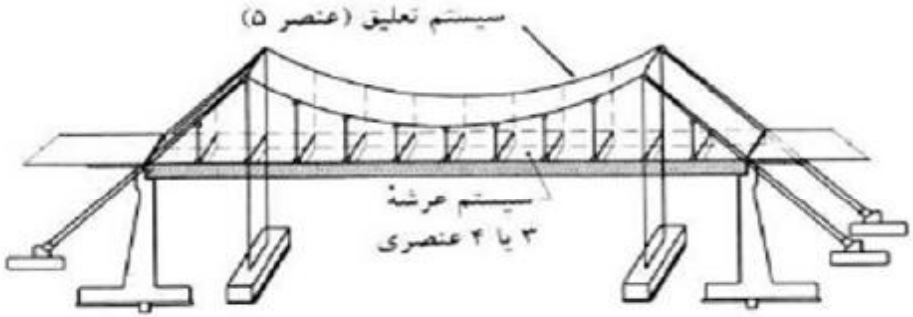
ترکیبی از سیستمهای سه یا چهارعنصری با

سیستم تعلیق(عنصر۵)

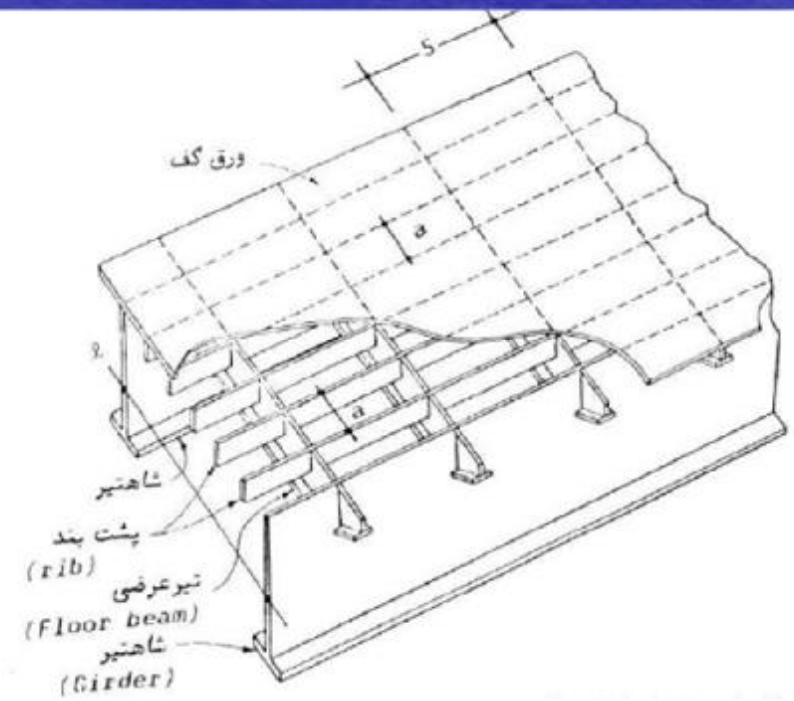
(برای دهانه‌های خیلی بزرگ)



(الف) سیستم تعلیق قوس فولادی



(ب) سیستم تعلیق کابل فولادی



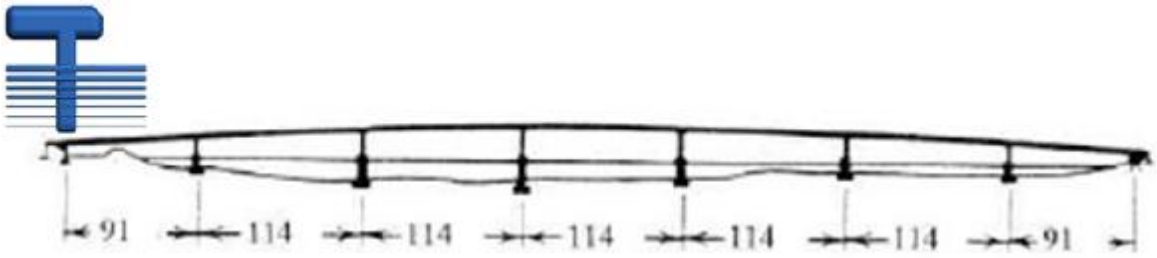
5 - 2 - عرشه های ارتوتروپیک

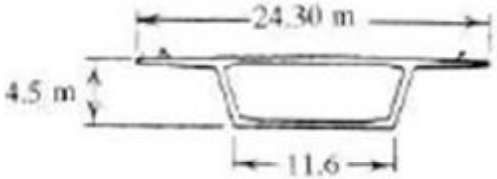
چهارعنصری که دال آن به ورق

تبدیل شده است.

5 - 3 - عرشه های جعبه‌ای تک سلولی

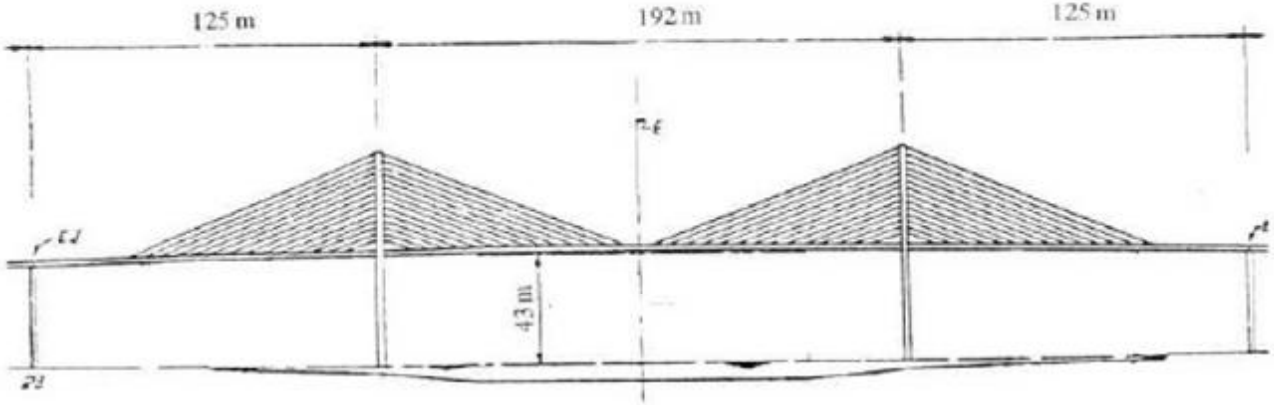
بدون سیستم تعلیق

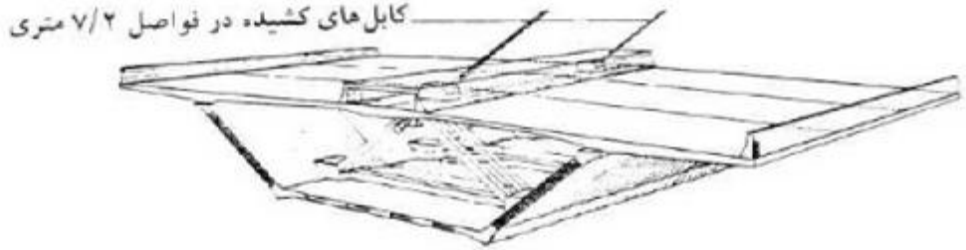




(اندازه‌ها به‌متر)

مقطع





با سیستم تعلیق

روشهای اجرای عرشه‌های بتنی

- Post-Tensioned Prestressed Concrete are often found in the form of segmentally precast members

Segmental Construction

Cantiliver Construction

* پلهای دهانه بلند

1 - سیستمهای قوسی (فولادی / بتنی)

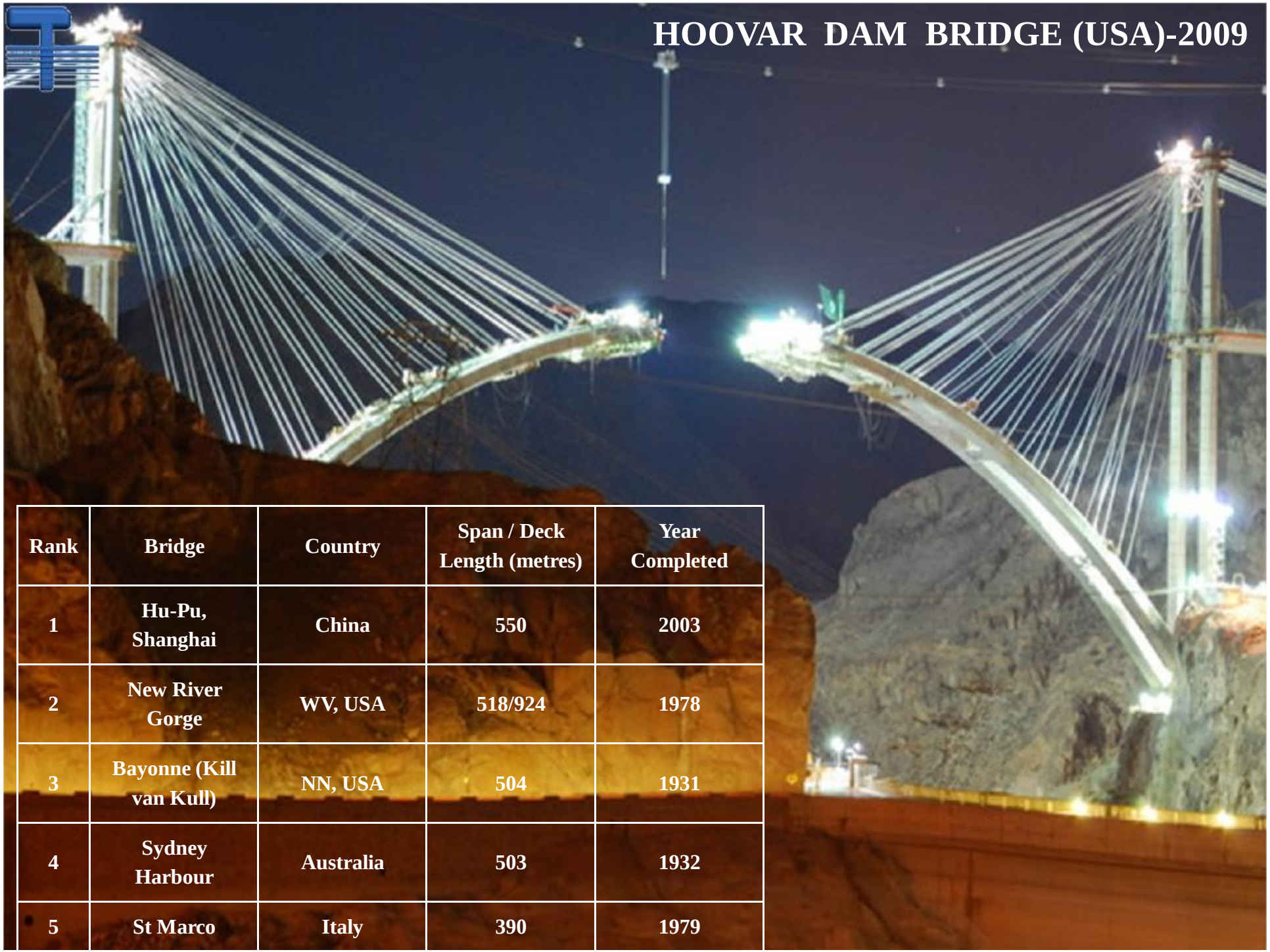
ترکیبی از سیستمهای سه ویا چهارعنصری با سیستم تعلیق(عنصر5) / در دهانه‌های خیلی بزرگ

(سیستم تعلیق قوس فولادی / بتنی)

سیستمهای سازه‌ای قوس

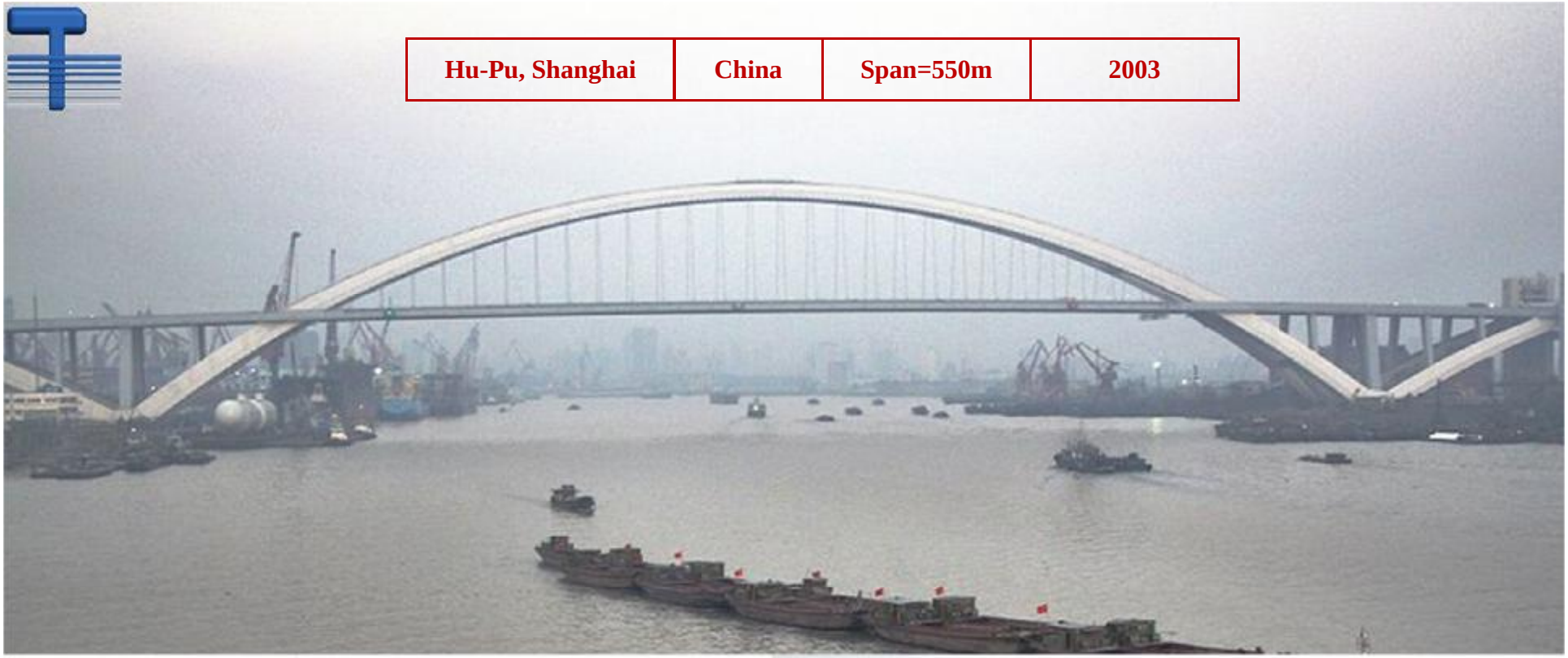
شکلهای مختلف قوس

HOOVAR DAM BRIDGE (USA)-2009



Rank	Bridge	Country	Span / Deck Length (metres)	Year Completed
1	Hu-Pu, Shanghai	China	550	2003
2	New River Gorge	WV, USA	518/924	1978
3	Bayonne (Kill van Kull)	NN, USA	504	1931
4	Sydney Harbour	Australia	503	1932
5	St Marco	Italy	390	1979

Hu-Pu, Shanghai	China	Span=550m	2003



Chaotianmen Bridge (2009)

TOTAL LENGTH	SPAN	STEEL	Chongqing
1741m	552		(China)

قوس با عرشه عبور از میان

New River Gorge (1977)

TOTAL LENGTH
924m

TOTAL LENGTH
924m

STEEL

WEST VIRGINIA
(USA)

قوس با عرشه عبور از بالا

(مناسب برای دره‌های عمیق)

TOTAL LENGTH
1682m

STEEL

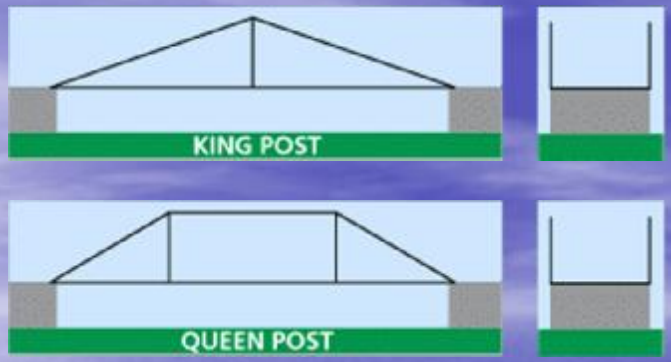
TOTAL LENGTH
308m

Dunaújváros
(HUNGRY)

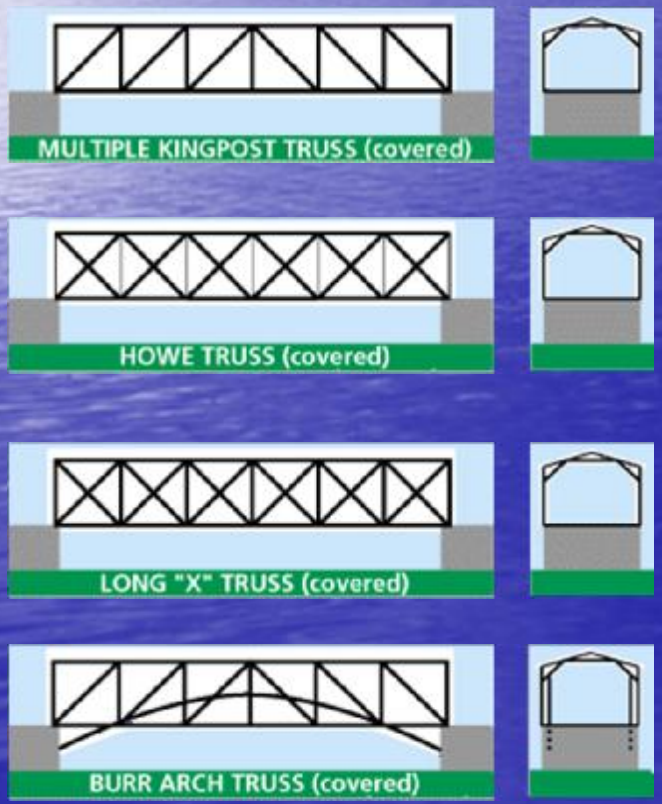
قوس با عرشه معلق

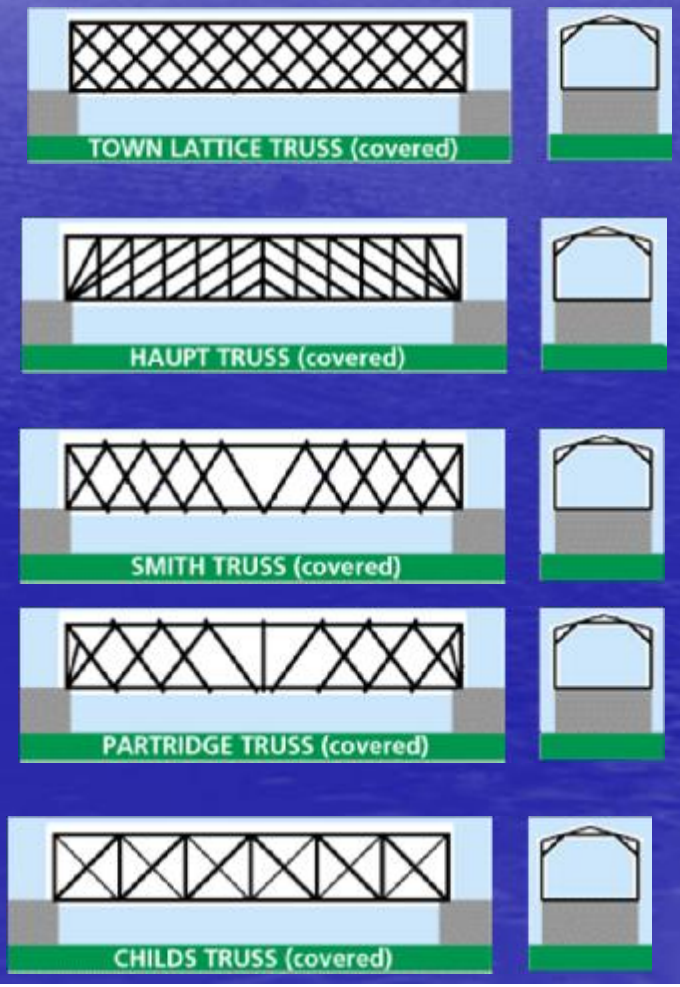
(مناسب برای عبور از مناطق کم عمق)

Truss - simple types

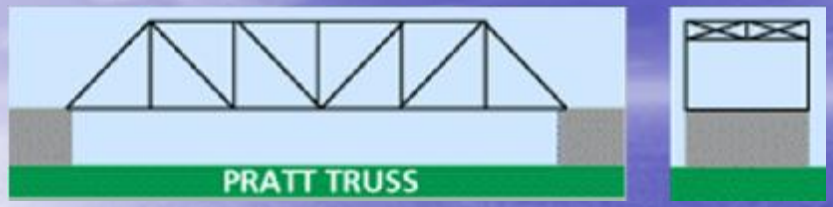


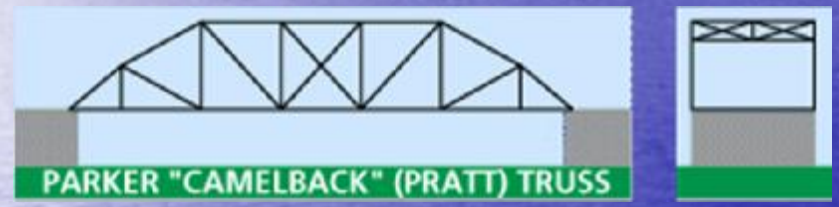
Covered bridge types (truss)





Truss - Pratt variations

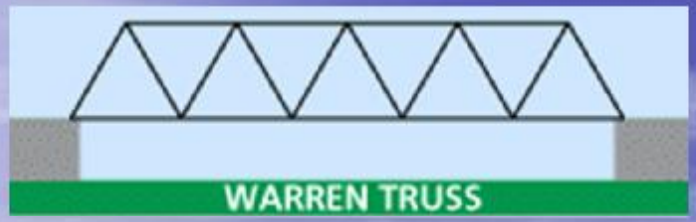


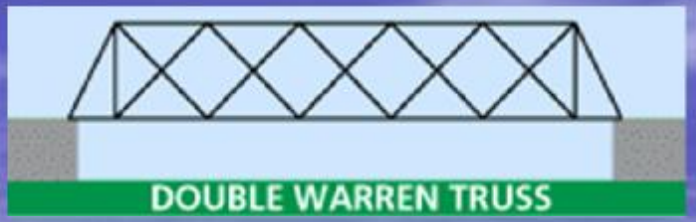


Truss - Whipple truss

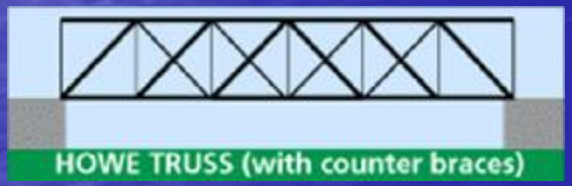
Truss - Whipple truss

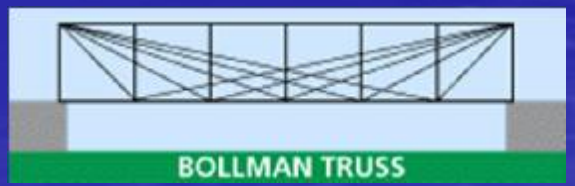
Truss - Warren variations





Truss – Other Types



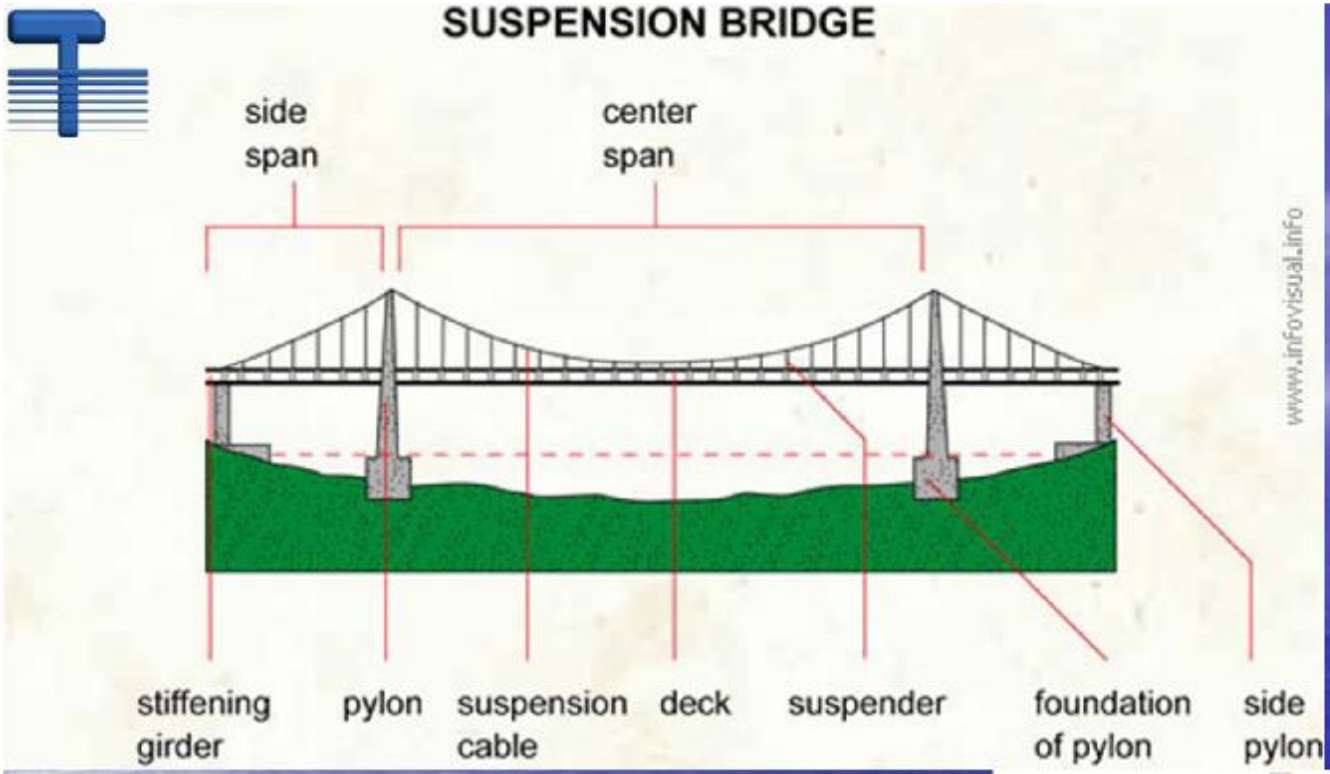


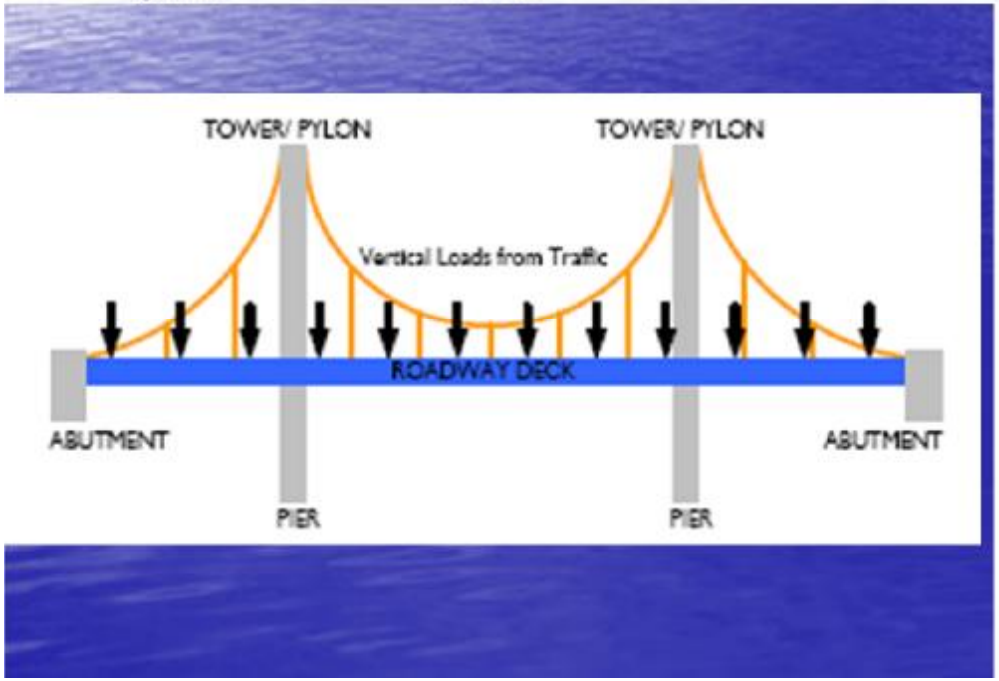
Cantilever types - truss

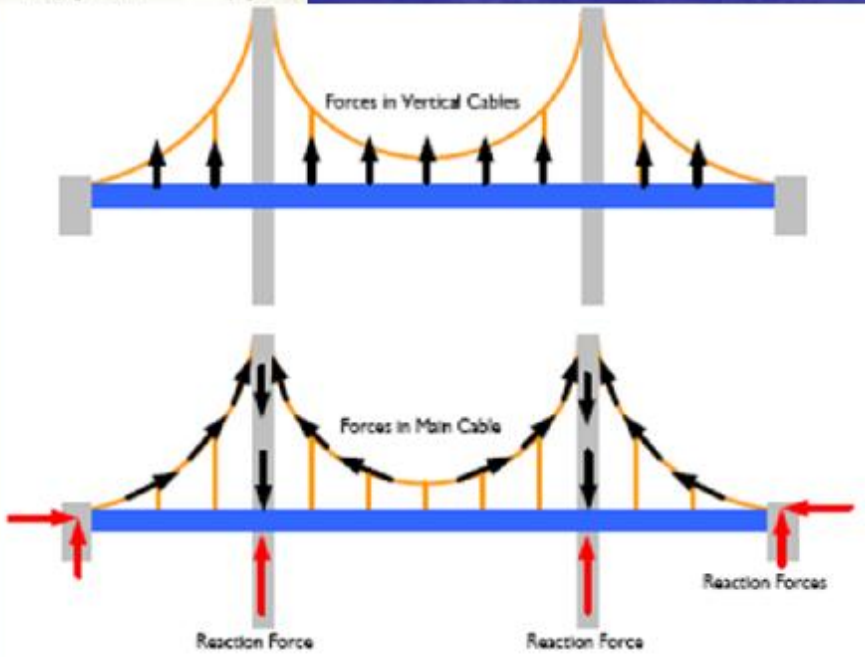
Rank	Bridge	Country	Span / Deck Length (metres)	Year Completed
1	Pont de Quebec	Canada	549/863	1917
2	Firth of Forth	Scotland	521/1042	1890
3	Minato (Southport) Osaka	Japan	510	1973
4	Chester-Bridgeport	USA	501	1972
5	Greater New Orleans I & II	USA	480	1958, 1988

Quebec Bridge	Canada	Span / Deck 549m / 863m	1917

۳– سیستمهای کابل معلق

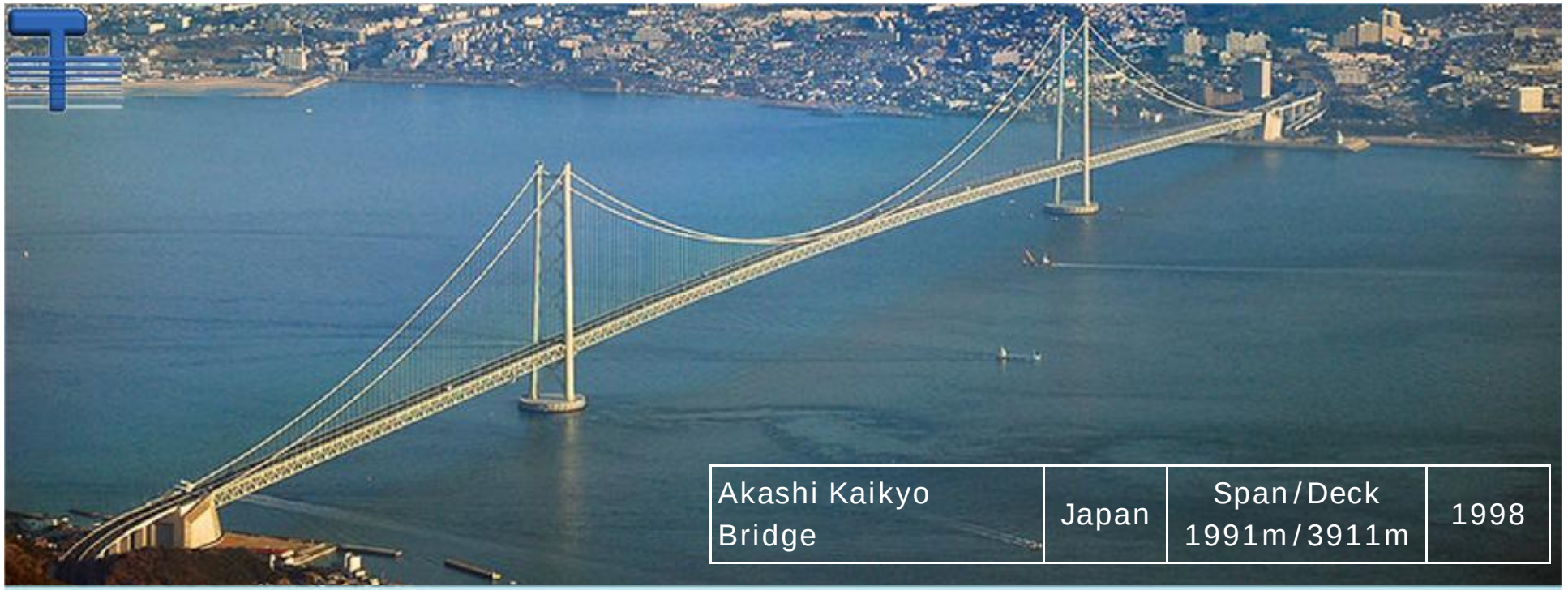






Rank	Bridge	Country	Span / Deck Length (metres)	Year Completed
1	Messina	Italy	3300/3666	incomplete (2011)
2	Kitan Straight	Japan	2500	incomplete
3	Qiongzhou Haixia	China	2500	incomplete
4	Akashi Kaikyo	Japan	1991/3911	1998
5	Izmit Bay	Turkey	1668	incomplete
6	Dongfang	China	1650	incomplete
7	Storebæltsbro (Great Belt Bridge)	Denmark	1624/6800	1997
8	Runyang (Zhenjian Yangzhou)	China	1490	2005
9	Ging Long Da Qiao	China	1418	incomplete (2007)
10	Humber	England	1410	1981
11	Jiangyin	China	1385	1999
12	Tsing Ma	China	1377	1997
13	Verrazano-Narrows	USA	1298	1964
14	Golden Gate	USA	1280	1937
15	Hoga Kusten	Sweden	1210	1997

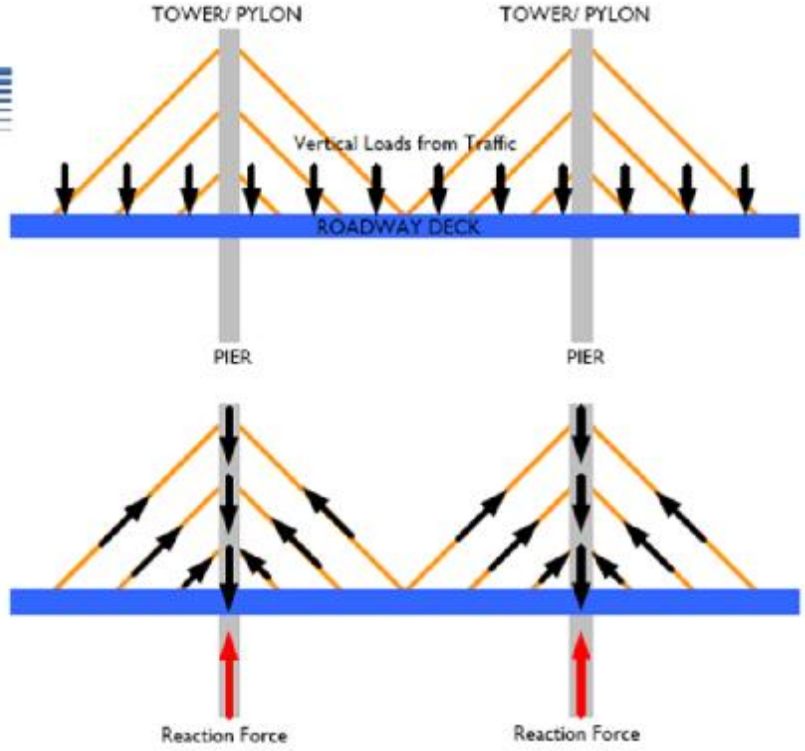
Hoga Kusten Bridge
(Sweden)



Akashi Kaikyo Bridge	Japan	Span/Deck 1991m/3911m	1998

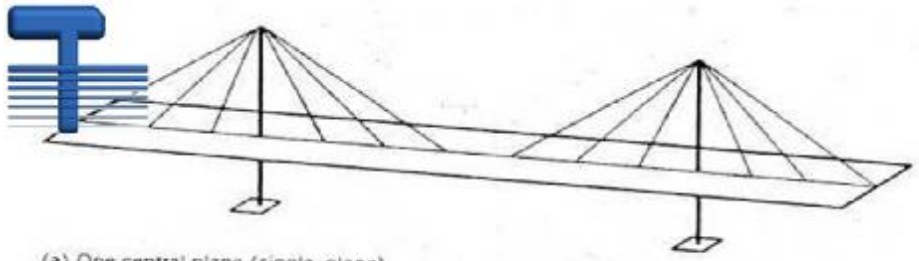
Storebæltsbro (Great Belt Bridge)	Denmark	Span/Deck 1624m/6800m	1997

4 - سیستم کابلهای کشیده (کابلهای ترکه‌ای)

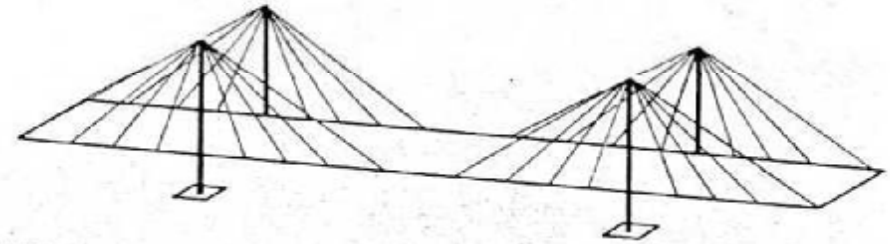


انواع سیستمهای ترکه‌ای

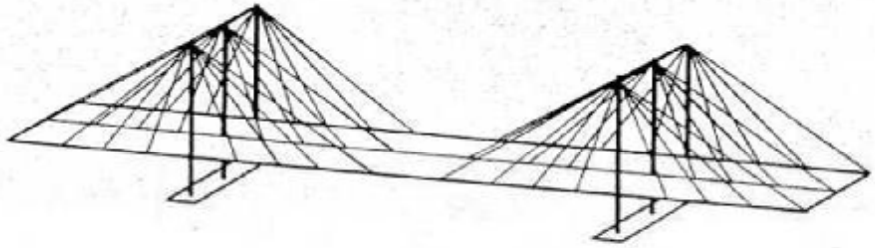
	تک	دوتایی	سه‌تایی	چندتایی	متغیر
متقارب					
موازی					
بادبزنی					
ستاره‌ای					



(a) One central plane (single, plane)

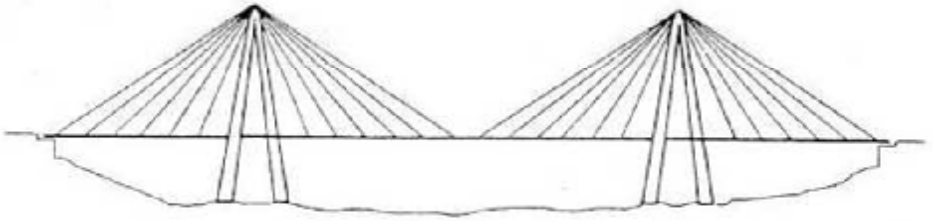


(b) Two lateral planes (double plane)

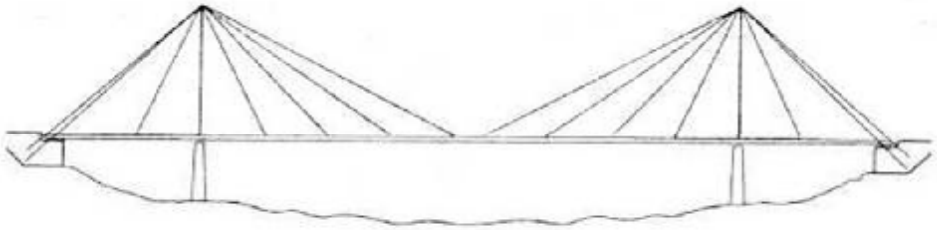


(c) Three planes (triple plane)

(a)



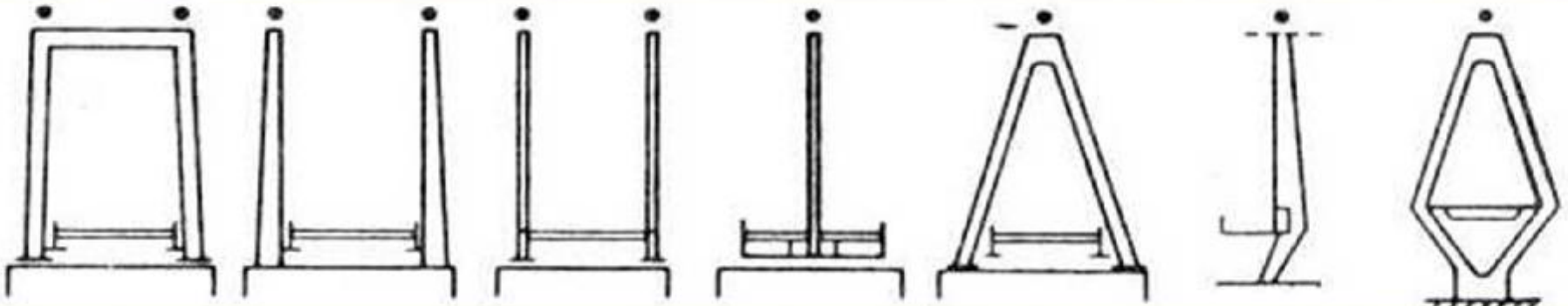
(b)



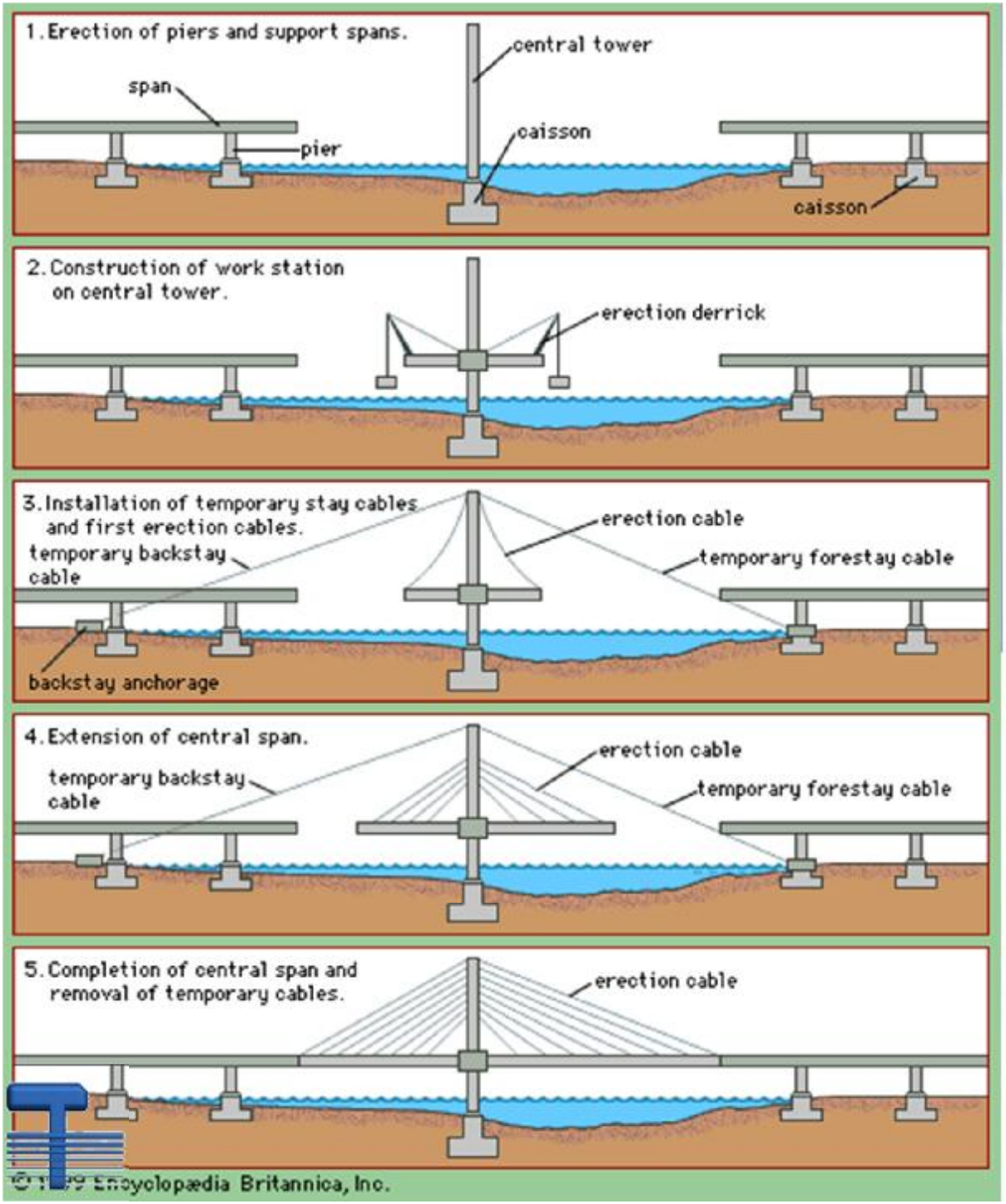
(c)

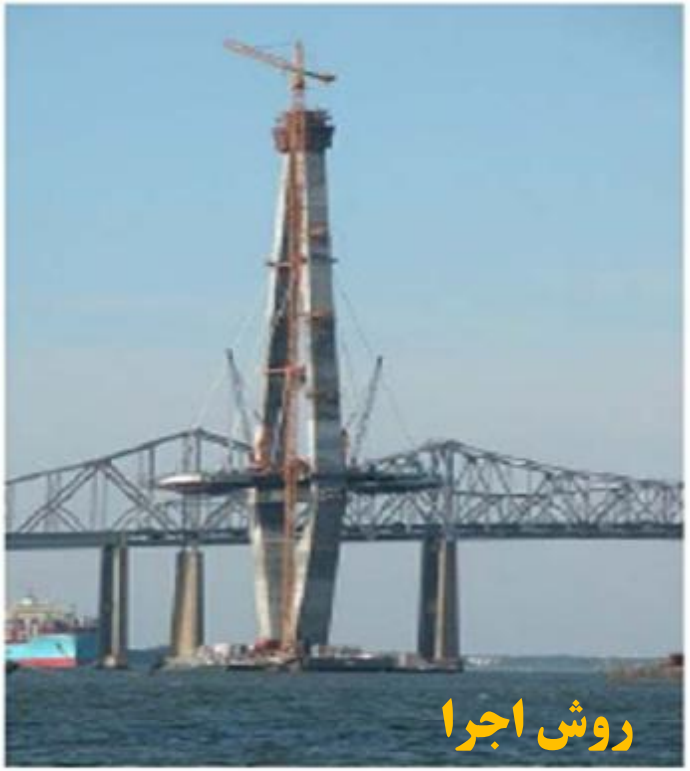
آرایش عرضی کابلها

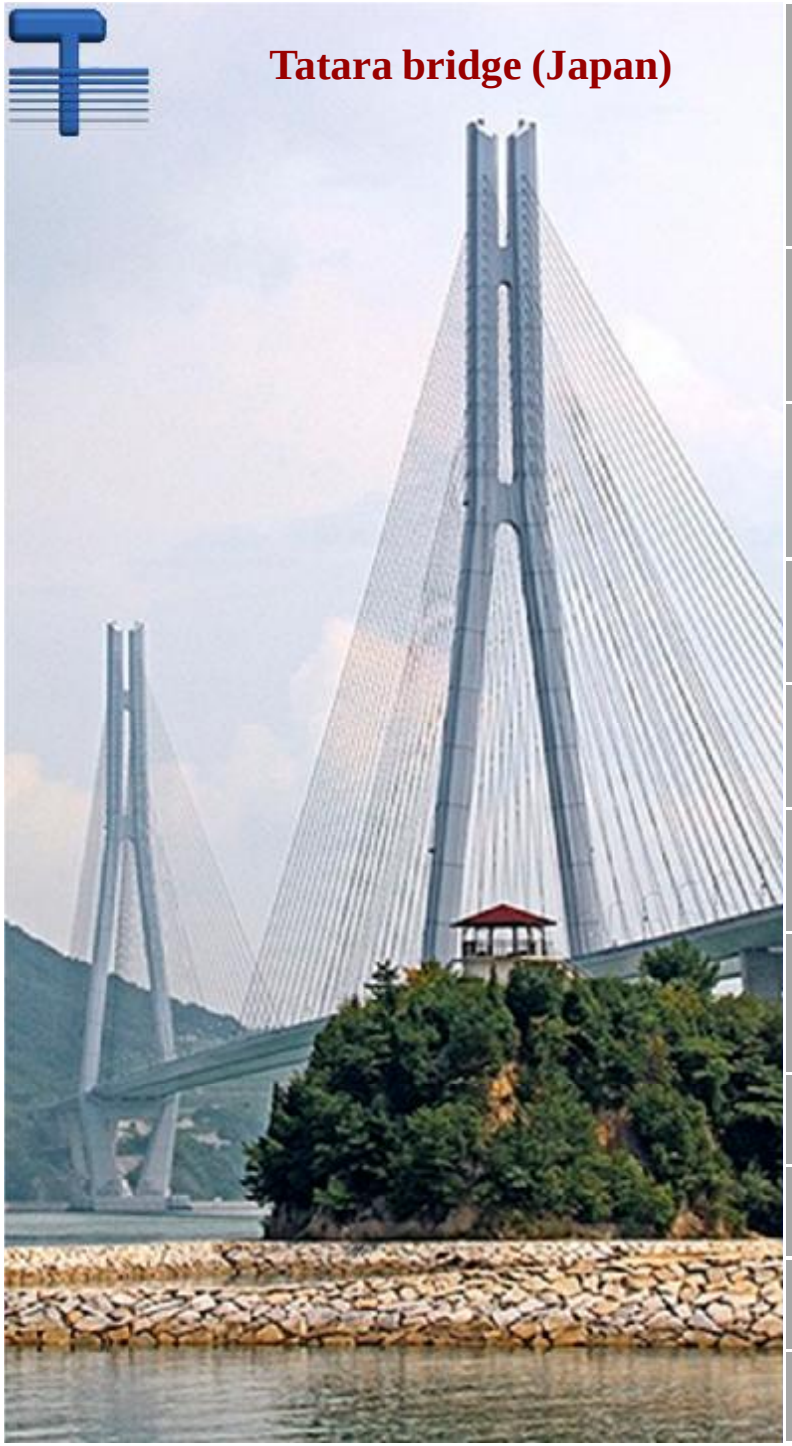
آرایش طولی کابلها



انواع مختلف پایه‌های ترکه ای

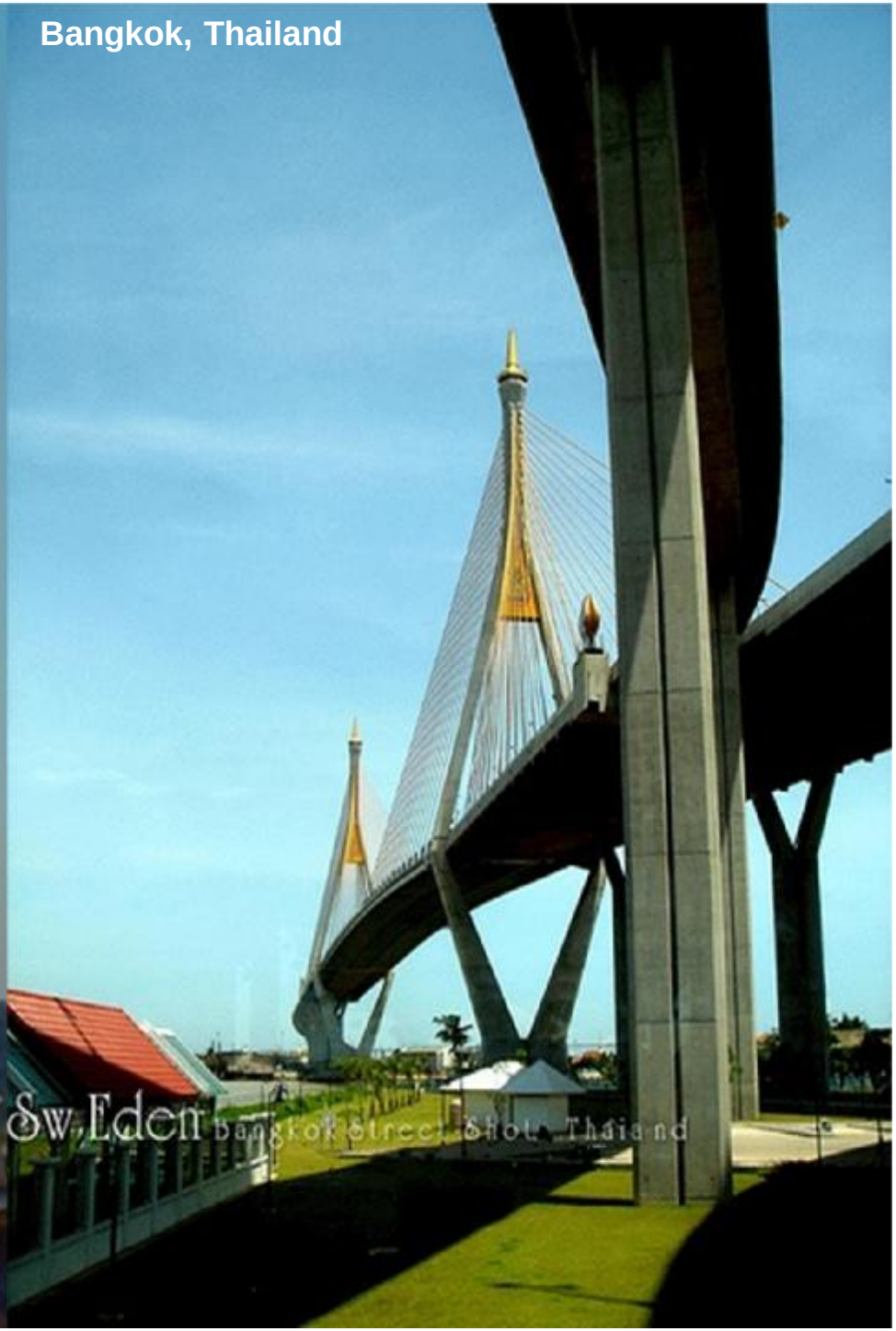

1. Erection of piers and support spans.
central tower
span
pier
caisson
caisson
2. Construction of work station on central tower.
erection derrick
3. Installation of temporary stay cables and first erection cables.
erection cable
temporary backstay cable
temporary forestay cable
backstay anchorage
4. Extension of central span.
erection cable
temporary backstay cable
temporary forestay cable
5. Completion of central span and removal of temporary cables.
erection cable
© 1999 Encyclopædia Britannica, Inc.


روش اجرا



Rank	Bridge	Country	Span / Deck Length (metres)	Year Completed
1	Suzhou-Nantong (Sutong)	China	1088/1944	incomplete (2008)
2	Stonecutters	Hong Kong	1018	incomplete (2007)
3	Dongfang	China	900	incomplete
4	Lingding	China	900	incomplete
5	Tatara	Japan	890/1480	1999
6	Pont de Normandie	France	856	1995
7	Nancha	China	628	2001
8	Baiahazhou	China	618	2000
9	Qingzhou	China	605	2003
10	Yangpu	China	602	1993

Normandie Bridge	France	Span 856	Year 1995



با تشکر