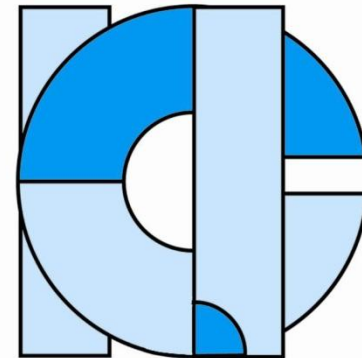




پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله



انجمن بتن ایران

# عملکرد بتن و طراحی سازه های بتنی در برابر آتش

مرتضی بسطامی

دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[m.bastami@iiees.ac.ir](mailto:m.bastami@iiees.ac.ir)



**با امتزاج به روع بزرگ آتش نشانان حادثه پلاسکو**

# مقدمه

- خطر حریق تا اندازه-ای در هر ساختمانی وجود دارد. ثابت شده که ایمنی کامل از حریق امری ناممکن است.
- خطرات لاینفک حریق در انواع ساختمان-ها، معمولاً فقط زمانی مشخص می-شود که یک آتش سوزی مهیب و کشنده توجه عموم را به خود جلب کند، همانند حریق زمین فوتبال برادفورد، ایستگاه متروی انگلستان، تونل--هایی در کشورهای اروپائی و امریکائی، ساختمان پلاسکو و ....
- اینگونه حریق-های بزرگ و مشخص، اهمیت طراحی ساختمان-ها و وظیفه به مذاقل رساندن خطرات حریق در ساختمان-ها را به مهندسان گوشزد می-کند.

**عملکرد بتن در برابر آتش**

# انواع Spalling

- در سال‌های اخیر سازه‌های بتنی بسیاری در جهان دچار آتش سوزی شدند و در بعضی از آنها خسارات بسیار زیادی مشاهده شد و این در صورتی بود که در بعضی از این سازه‌ها از بتن با مقاومت بالا استفاده شده بود.
- در این سازه‌ها بتن با مقاومت بالا دچار آسیب‌های جدی شده بود، از جمله دارای سطحی پوسته پوسته و کاهش مقاومت بالا و در چندین مکان به طور کلی از بین رفته بود.
- در نتیجه برای بررسی این مشکل آزمایشات بسیاری توسط مهندسين صورت گرفت که هرکدام از آنها برای بر طرف کردن این چنین اتفاقی پیشنهادهاي بسیاری داده‌اند که در بخش‌های بعدی به آنها اشاره می‌شود.

# تاریخچه بررسی عملکرد بتن در برابر آتش

- Gary (۱۹۱۶) از جمله اولین کسانی بود که در آزمایشات خود عملکرد بتن را در برابر آتش مورد بررسی قرار داد، او در آزمایشات خود با پوسته پوسته شدن سطح بتن در بسیاری از المان-های خود مواجه شد.

# انواع Spalling

۱. Spalling انفجاری با صدای بسیار بلند و شکست شدید (Explosive Spalling)
۲. Spalling سطح با صدای تری خوردن و شکست شدید (Surface Spalling)
۳. Spalling سنگدانه-ها، با صدای پاپینگ (Aggregate Spalling)
۴. Spalling گوشه-ها با شکستی آراهِ (Corner Spalling)

این نوع از Spalling زمانی در بتن رخ میدهد که قسمتی از بتن در نزدیکی آتش قرار گیرد و معمولاً در زمانی کمتر از 30 دقیقه برای آتشی با استاندارد furnace test رخ میدهد.

هنگامی که این پدیده رخ میدهد قطعات کوچک و بزرگ بتن با شدت زیادی از سطح بتن پرتاب میشوند که این قطعات در اندازه های کوچک به میزان 100 mm و بزرگ به اندازه های 300mm میباشند و در عمق 15-20 mm از سطح بتن رخ میدهد (Ciria 1984).

زمانی که بتن با مقاومت بالا در معرض آتش قرار میگیرد تکه هایی از سطح بتن جدا شده و با شدت زیادی پرتاب میشوند (Khoury 2003).



Surface Spalling

# سطحی Spalling

هنگامی که بتن در معرض آتش یا حرارت بالا قرار میگیرد تکه های کوچکی از سطح بتن جدا میشوند (با اندازه ی حداکثر 20mm).

# Spalling سنگدانه

این نوع Spalling هنگامی که سنگدانه ها در نزدیکی سطح دچار شکست میشوند (با صدای پاپینگ) رخ میدهد .

این نوع Spalling معمولاً در دمایی بین 570 تا 700 درجه اتفاق میافتد زیرا در این دما سنگدانه ها دچار تغییرات فیزیکی و شیمیایی میشوند ، بخصوص سنگدانه های آهکی، هماتیت و کوارتز (Ciria 1984).

# Spalling گوشه

## Corner Spalling

همان گونه که از نام مشخص است این نوع Spalling در گوشه ها اتفاق میافتد زیرا در گوشه ها تمرکز تنش وجود دارد و نرخ افزایش حرارت در آنها بیشتر میباشد.

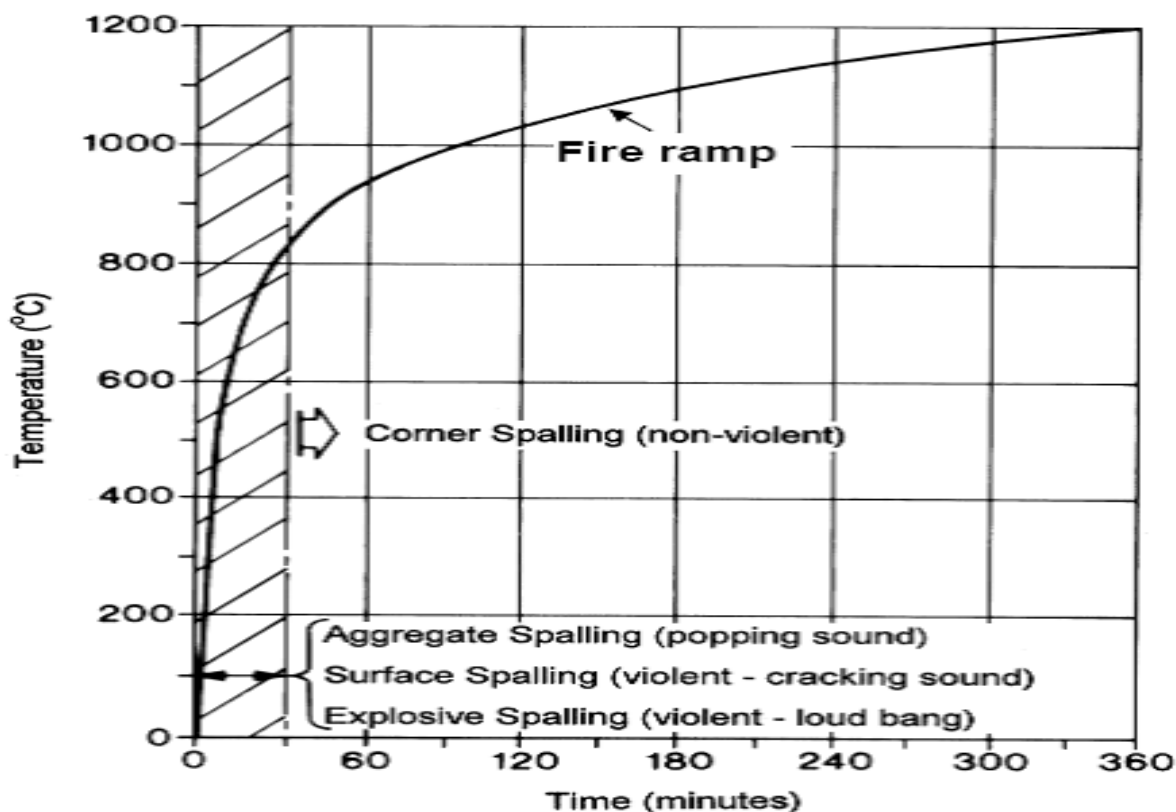
از میان چهار نوع Spalling گفته شده در بالا، Spalling انفجاری از همه مهمتر بوده و در صورت رخ دادن این نوع Spalling، بتن دچار خسارت بسیار زیادی شده و مقاومت آن به شدت کاهش مییابد.

# زمان رخ دادن هر یک از spalling

Spalling انفجاری، Spalling سطحی و Spalling سنگدانه در مدت زمان 7-30 دقیقه ابتدایی

آتش سوزی رخ میدهند،

Spalling گوشه در مدت زمان 30-90 دقیقه بعدی رخ میدهد.



# مهمترین دلایل رخ دادن پدیده Spalling

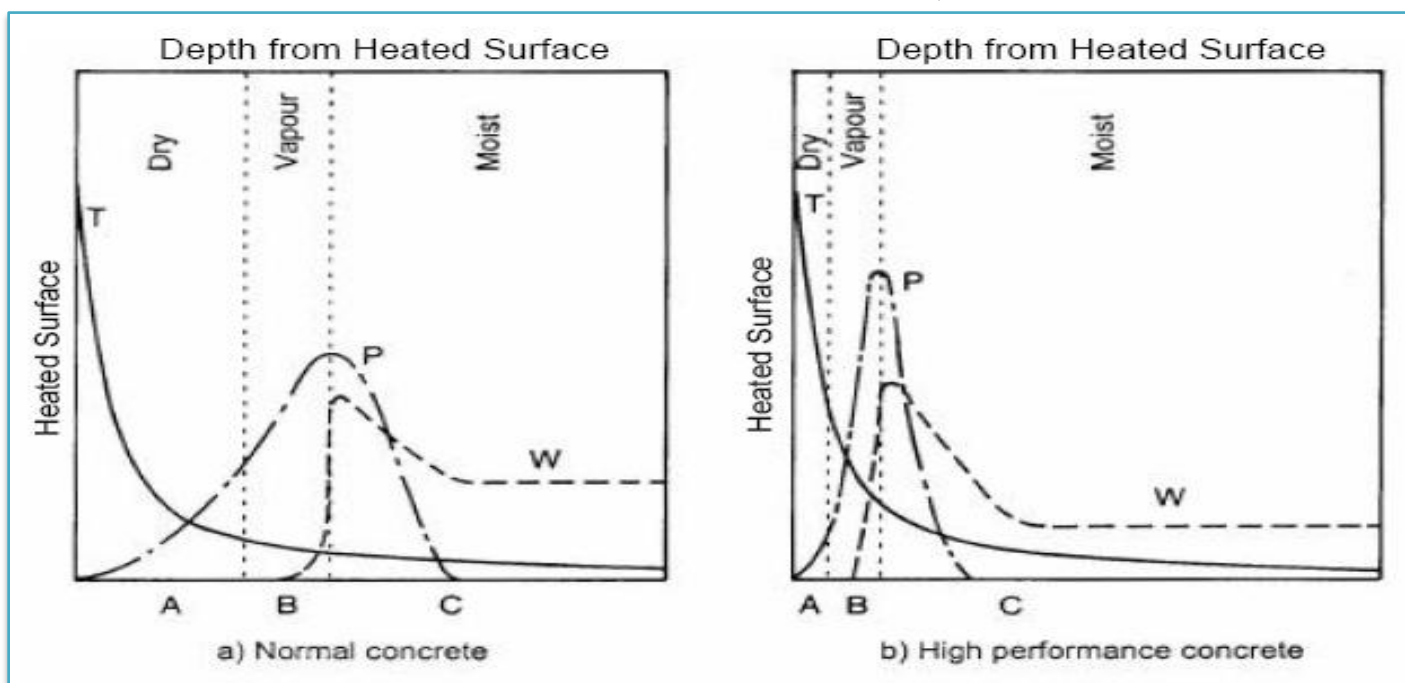
۱. فشارهای منفذی (Pore pressure)
۲. تنش-های حرارتی (Thermal stress)
۳. تاثیر هم زمان دو پارامتر بالا

دقیقا نمی-توان بیان کرد که کدام عامل بالا دارای اهمیت بیشتری نسبت به دیگری می-باشد. هنگامی که بتن با مقاومت بالا در معرض آتش یا حرارت بالا قرار می-گیرد مقداری از آب موجود در بتن بخار شده و به علت نفوذ-پذیری بسیار کم بتن با مقاومت بالا بخار ایجاد شده قادر به فرار از درون بتن نبوده و این بخار یک فشار داخلی در بتن ایجاد می-کند که این فشار با افزایش حرارت افزایش می-یابد، بخار فشاری معادل ۸ تا ۱۰ مگا پاسکال ایجاد می-کند که این فشار از مقاومت کششی بتن با مقاومت بالا بیشتر بوده و باعث ایجاد ترک-هایی در بتن و پوسته پوسته شدن سطح آن می-شود

# مهمترین دلایل رخ دادن پدیده Spalling

علت رخ ندادن پدیده Spalling انفجاری در بتن‌های معمولی را می‌توان نفوذپذیری بالا این بتن‌ها نام برد. نفوذپذیری بالا باعث می‌شود که بخار ایجاد شده در بتن به راحتی بتواند از درون منافذ بتن فرار کند و هیچ گونه فشاری ایجاد نکند. فشار منفذی (Pore pressure) رابطه مستقیم با رطوبت بتن دارد. بتن را می‌توان از نظر رطوبتی به سه ناحیه تقسیم کرد:

۱. ناحیه خشک، که نزدیک سطح بتن می‌باشد (Dry zone)
۲. ناحیه میانی یا ناحیه بخار (Evaporation intermediate zone)
۳. ناحیه رطوبت اشباع (Moisture saturated zone)



W: رطوبت  
T: گرادیان حرارتی  
P: فشار بخار

عملکرد بتن های با مقاومت **بالا** در حرارت

# مطالعه آزمایشگاهی

بتن-های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۶۰ مگا پاسکال

# مصالح استفاده شده

- در این مطالعه برای ساخت بتن با مقاومت بالا از سیمان پرتلند تیپ ۱، میکروسیلیس، فوق روان کننده از نوع PVC، ماسه شسته رودخانه‌ای با مدول نرمی ۳.۰ و شن شکسته از جنس سیلیسی با حداکثر اندازه ۱۰ mm استفاده شد.



# روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

مورد	ترکیبات شیمیایی (%)	
	سیمان پرتلند تیپ 1	میکروسلیس
$S_iO_2$	22	95.0
$AL_2O_3$	6.6	0.9
$Fe_2O_3$	2.8	0.6
$CaO$	60.1	0.3
$MgO$	3.3	0.9
$SO_3$	2.1	0.5
$LOI$	2.6	2.1
	خواص فیزیکی	
وزن مخصوص	3.15	2.33
میانگین اندازه ذرات	13 میکرو متر	0.1 میکرومتر
$SSA(m^2/g)$	0.38	20

# روش ساخت، عمل آوری و آزمایش نمونه ها

- وزن کردن مصالح
- اختلاط آب و فوق روان-کننده(۱۵ دقیقه قبل از مخلوط کردن)
- مخلوط کردن سیمان و میکروسیلیس برای بدست آوردن یک مخلوط یک دست
- ریختن شن درون میکسر و اضافه کردن آب به میزان یک سوم و اختلاط آنها به مدت ۲-۳ دقیقه
- اضافه کردن ماسه به مخلوط قبلی و اختلاط آنها به مدت ۳-۵ دقیقه
- اضافه کردن مخلوط سیمان و میکروسیلیس در سه مرحله
- اضافه کردن آب در سه مرحله
- خاموش کردن میکسر به مدت ۲ دقیقه(قبل از یک مرحله پایانی برای آب )
- روشن کردن میکسر و اضافه نمودن آب باقی مانده(به مدت ۵ دقیقه)
- ریختن بتن آماده شده درون قالب-ها در سه مرحله(در هر مرحله ۲۵ ضربه با میله)
- قرار دادن نمونه-ها بر روی میز ویبره به مدت ۵ ثانیه(در صورت کم بودن اسلامپ)

# روش ساخت، عمل آوری و آزمایش نمونه ها



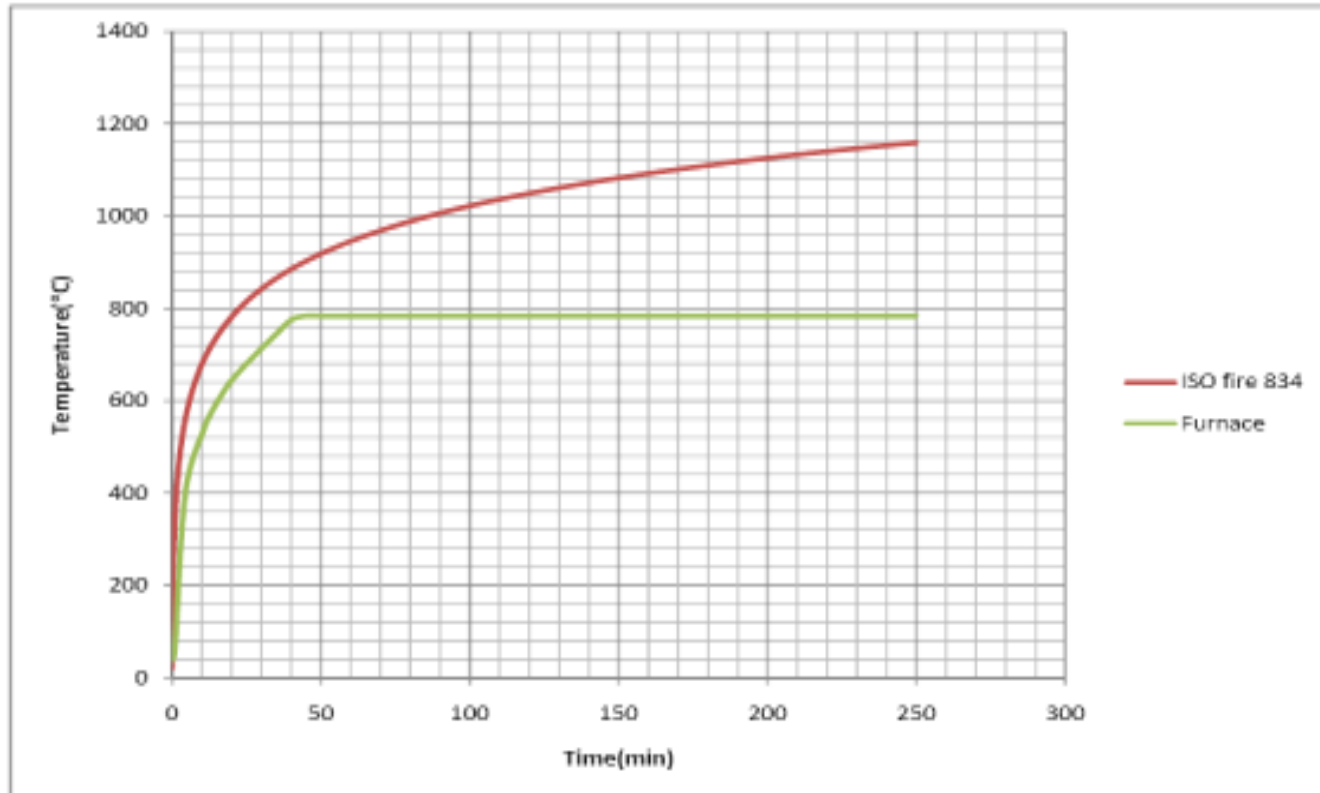
# روش ساخت، عمل آوری و آزمایش نمونه ها

- بعد از 28 روز عمل آوری در آب، برای خشک کردن سطح نمونه ها، نمونه ها به مدت 24 ساعت در هوای آزاد قرار گرفتند.
- بعد از خشک شدن، نمونه ها وزن شده و در کوره الکتریکی قرار داده شدند.
- دمای هدف در این تحقیق  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  با سرعت افزایش تقریبی  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  در نظر گرفته شد. بعد از رسیدن به این دما، نمونه ها به مدت یک ساعت در این دما قرار گرفته و سپس به مدت 24 ساعت در دمای محیط به آهستگی سرد شدند.
- بعد از رسیدن دمای نمونه ها به دمای محیط میزان کاهش جرم (mass loss) و مقاومت پسماند نمونه ها در اثر حرارت بالا اندازه گیری شد.

# روش های طراحی سازه ها در برابر حریق



# منحنی حرارتی کوره



مقایسه تخریبات دمایی کوره با منحنی استاندارد ISO ۸۳۴

# روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

- برای شکستن نمونه-ها از جک فشاری با ظرفیت ۳۰۰ تن استفاده شد. نمونه-ها قرار گرفته در برابر حرارت بالا به علت رخ دادن پدیده Spalling دارای سطحی ناصاف شدند و برای شکست آنها ابتدا سطح نمونه-ها کپینگ شده تا دارای سطحی صاف باشند و سپس زیر جک فشاری قرار داده شدند.
- عمل کپینگ کردن برای نمونه-ها عادی و نمونه-ها گذاشته شده درون کوره صورت گرفت.



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
1	159	550	0	608	1182	68.24	5.68	71	69

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f,c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f,t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
1.1	13.32	12.32	7.54	70.14	22.28	68.23				71.38	
1.2	13.21	11.84	10.37	66.51	17.70	73.38					
1.3	13.98	12.93	7.51	68.07	18.69	72.53					
1.4	13	12	7.69				5.84	1.98	66.04	69.01	
1.5	12.86	11.97	6.90				5.42	1.58	70.82		
1.6	13.52	12.52	7.38				5.78	1.72	70.17		

### Spalling

1.1-1.3	Spalling چشم گیری در نمونه ها رخ نداده است. در نواحی که Spalling رخ نداده است شکل ترکها سوسماری بوده و در بقیه نقاط ترکها افقی و عمودی است.
1.4-1.6	تنها spalling رخ داده شده spalling سنگدانه می باشد.

### Photo

1.1-1.3			
1.4-1.6			



**W:** آب،

**C:** سیمان،

**Sf:** میکروسیلیس،

**fin:** ماسه،

**crass:** شن،

**F<sub>c</sub>:** مقاومت فشاری،

**F<sub>t</sub>:** مقاومت کششی،

**R.f<sub>c</sub>(%):** درصد کاهش مقاومت فشاری،

**R.f<sub>t</sub>(%):** درصد کاهش مقاومت کششی،

**F<sub>f.c</sub>:** مقاومت فشاری در دمای 800 درجه،

**F<sub>f.t</sub>:** مقاومت کششی در دمای 800 درجه،

**A. R.f<sub>c</sub>(%):** میانگین درصد کاهش مقاومت فشاری،

**A. R.f<sub>t</sub>(%):** میانگین درصد کاهش مقاومت کششی

Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
2	159	550	0	644	1146	65.42	5.74	73	68

### Information of test data

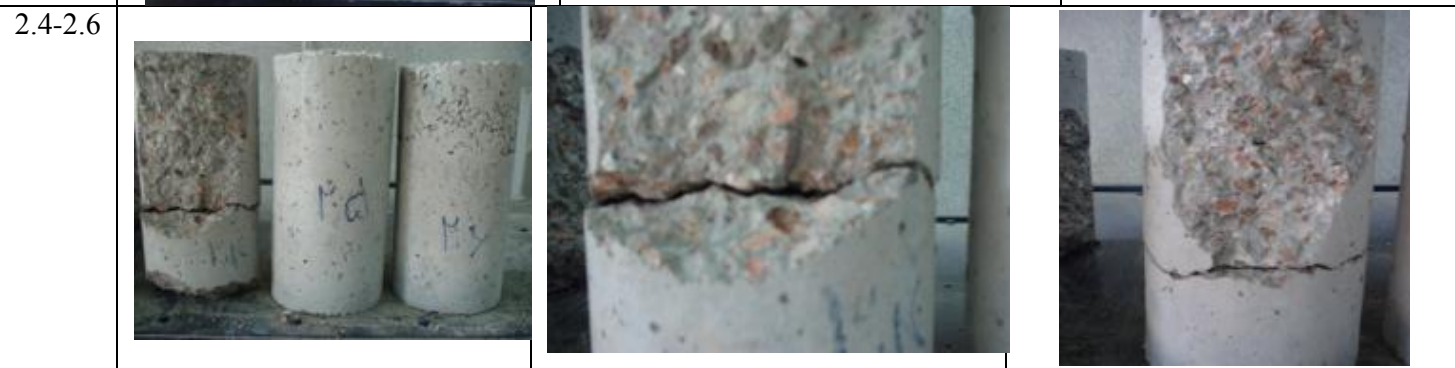
Sampl e No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f.c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f.t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A.R.f <sub>c</sub> (%)	A.R.f <sub>t</sub> (%)
2.1	13.15	11.24	14.52	67.34	17.47	74.05				73.14	
2.2	13.33	12.155	8.81	64.47	18.89	70.69					
2.3	12.76	11.16	12.53	64.45	16.31	74.68					
2.4	13.04	6.3+4.1	19.78				5.78	1.78	69.08	68.18	
2.5	13.1	12.07	7.86				5.63	1.62	71.19		
2.6	12.78	11.8	7.66				5.81	2.07	64.27		

### Spalling

2.1-2.3 بیشترین spalling های رخ داده spalling گوشه و spalling سطح و spalling سنگدانه می باشد.

2.4-2.6 دو نمونه دچار spalling نشده ولی یکی از نمونه ها دچار spalling انفجاری و sapling سطح شده است.

### Photo



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
3	159	550	0	680	1110	64.78	5.48	65	68

### Information of test data

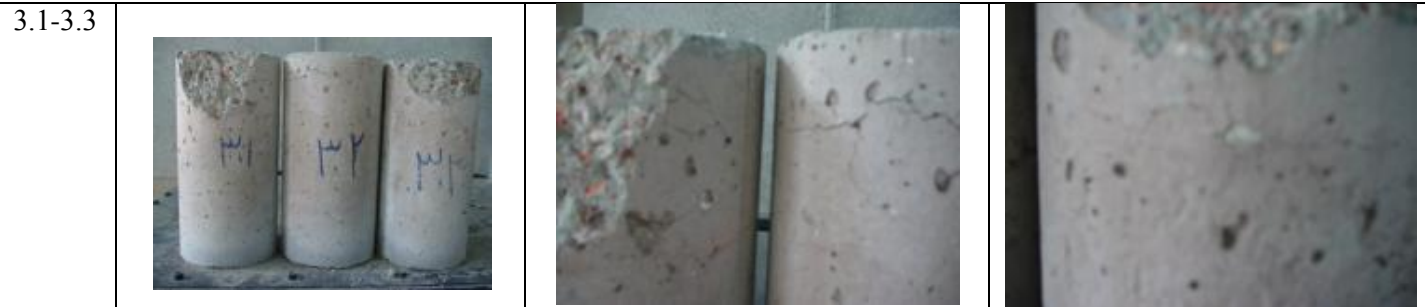
Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f,c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f,t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
3.1	13.15	11.77	10.49	66.04	22.21	66.36				65.28	
3.2	13.44	11.96	11.01	63.74	20.05	68.54					
3.3	13.08	11.85	9.43	64.56	25.21	60.94					
3.4	13	11.185	13.96				5.81	1.70	70.7	68.84	
3.5	13.16	12.178	7.52				6.04	2.10	65.19		
3.6	13.27	12.29	7.38				4.59	1.34	70.63		

### Spalling

3.1-3.3 نمونه ها بیشتر دچار spalling گوشه شده اند و دیگر spalling ها یا رخ نداده اند یا قابل چشم پوشی می باشند.

3.4-3.6 نمونه ها بیشتر دچار spalling گوشه شده اند و دیگر spalling ها یا رخ نداده اند یا قابل چشم پوشی می باشند.

### Photo



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
4	159	550	0	716	1074	61.71	5.30	64	60

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f.c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f.t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
4.1	13.02	11.96	8.16	64.24	21.06	67.21				64.51	
4.2	12.73	11.44	10.16	62.74	24.46	61					
4.3	12.80	11.59	9.48	58.15	20.16	65.32					
4.4	13.69	12.63	7.77				5.8	2.45	57.74		60.73
4.5	12.91	11.98	7.20				4.84	2.12	56.08		
4.6	13.9	12.855	7.51				5.26	1.66	68.37		

### Spalling

4.1-4.3 تنها sapling گوشه مشاهده شده است.

4.4-4.6 به غیر از spalling سنگدانه خاصی رخ نداده است

### Photo

4.1-4.3



4.4-4.6



Mix No.	w	c	sf	fin	cras s	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
5	159	550	0	572	1038	60.92	5.11	75	63

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f.c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f.t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
5.1	12.54	10.87	13.31	63	13.8	78.04				75.36	
5.2	12.81	7.51+2.73	20	62.31	18.9	69.57					
5.3	12.94	11.14	13.94	57.45	12.36	78.47					
5.4	13.14	9.36	28.77				5.42	2.2	59.37		63.74
5.5	13.25	11.05	16.60				4.84	2.25	53.48		
5.6	13.35	9.10	31.78				5.07	1.09	78.37		

### Spalling

5.1-5.3	هر چهار نوع spalling رخ داده است ولی spalling انفجاری بیشتر مشاهده شده است (از صدا ، ترک ها و شکل نمونه ها)
5.4-5.6	به غیر از spalling انفجاری بقیه Spalling ها رخ داده اند. و Spalling گوشه در تمامی نمونه ها قابل مشاهده است

### Photo



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
6	159	550	0	787	1003	58.37	4.87	58	53

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f.c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f.t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
6.1	12.8	11.74	8.28	54.38	24.97	54.07				58.68	
6.2	12.84	8.56+2.02	17.60	57.87	23.35	59.64					
6.3	13.03	8.14+2.67	16.98	62.86	23.67	62.33					
6.4	13.287	8.15+1.78	25.26				5.01	2.49	50.14		53.31
6.5	13.162	11.32	13.99				4.17	1.86	55.23		
6.6	13.215	11.58	12.35				5.43	2.46	54.56		

### Spalling

6.1-6.3 به غیر از spalling گوشه، تمامی Spallingها به مقدار بالایی رخ داده اند مخصوصاً Spalling انفجاری

6.4-6.6 تمامی Spallingها به مقدار بالایی رخ داده اند مخصوصاً Spalling انفجاری

### Photo

6.1-6.3



6.4-6.6



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
7	159	528	22	680	1110	72.85	6.53	76	72

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f.c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f.t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
7.1	13.00	11.1	14.64	68.56	20.83	69.61				76.47	
7.2	13.02	7.41+3.1	19.50	70.45	18.54	73.68					
7.3	13.04	7.23+2.4	26.07	79.54	11.04	86.12					
7.4	13.21	6.13+4.2	21.37				5.47	1.51	72.24		72.05
7.5	13.01	11.6	10.87				6.1	1.82	70.01		
7.6	12.81	10.91	14.86				8.02	2.09	73.9		

### Spalling

7.1-7.3 تمامی Spalling ها به مقدار بالایی رخ داده اند مخصوصاً Spalling انفجاری

7.4-7.6 تمامی Spalling ها به مقدار بالایی رخ داده اند مخصوصاً Spalling انفجاری

### Photo



Mix No.	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
8	159	506	44	680	1110	75.36	6.87	79	67

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f,c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f,t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
8.1	13.15	11.32	13.91	72.07	15.61	78.34				79.27	
8.2	13.16	11.2	14.89	76.78	19.95	74.01					
8.3	13.945	11.38	18.39	77.23	11.22	85.46					
8.4	13.27	9.57	27.88				5.84	1.97	66.24		67.71
8.5	13.67	11.75	14.04				6.8	2.16	68.12		
8.6	13.1	11.22	14.35				7.97	2.48	68.77		

### Spalling

8.1-8.3	Spalling سطحی و Spalling گوشه به مقدار بالایی مشاهده شد.
8.4-8.6	Spalling سطحی و Spalling گوشه به مقدار بالایی مشاهده شد.

### Photo

8.1-8.3			
8.4-8.6			



Mix No	w	c	sf	fin	crass	F <sub>c</sub>	F <sub>t</sub>	R.f <sub>c</sub> (%)	R.f <sub>t</sub> (%)
9	159	484	66	680	1110	76.47	7.14	73	59

### Information of test data

Sample No.	Initial weight	Second weight	Spalling degree	F <sub>c</sub> (Mpa)	F <sub>f,c</sub> (Mpa)	R.f <sub>c</sub> (%)	F <sub>t</sub> (Mpa)	F <sub>f,t</sub> (Mpa)	R.f <sub>t</sub> (%)	A. R.f <sub>c</sub> (%)	A. R.f <sub>t</sub> (%)
9.1	13.25	11.82	10.75	72.38	21.66	70.07				73.84	
9.2	13.05	10.17	22.06	75.87	18.92	75.06					
9.3	12.84	10.67	16.87	81.16	19.16	76.39					
9.4	13	11.03	15.14				6.57	2.94	55.14	59.08	
9.5	12.45	10.77	13.47				6.86	3.00	56.26		
9.6	12.94	10.33	20.16				7.99	2.72	65.84		

### Spalling

9.1-9.3 Spalling گوشه به مقدار خیلی بالا و Spalling سطح به مقدار بالا مشاهده شد

9.4-9.6 Spalling گوشه به مقدار خیلی بالا و Spalling سطح به مقدار بالا مشاهده شد

### Photo

9.1-9.3



9.4-9.6





طرح اختلاط 1



طرح اختلاط 2



طرح اختلاط 3



طرح اختلاط 4



طرح اختلاط 5



طرح اختلاط 6



طرح اختلاط 7



طرح اختلاط 8



طرح اختلاط 9

# انتخاب طرح اختلاط

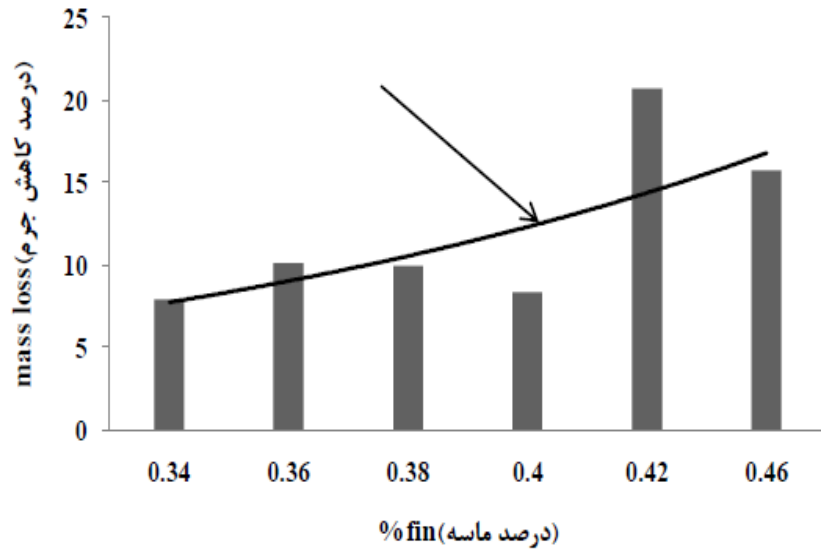
طرح اختلاط	<i>Sf</i>	<i>ss</i>	<i>cra. c</i>	<i>Fin</i>	<i>w</i>	طرح اختلاط
طرح اختلاط-های بدون میکروسیلیس						
۱	۱۵۹	۵۵۰	۶۰۸	۱۱۸۲	۰	۶۸.۲۴
۲	۱۵۹	۵۵۰	۶۴۴	۱۱۴۶	۰	۶۵.۴۲
۳	۱۵۹	۵۵۰	۶۸۰	۱۱۱۰	۰	۶۴.۷۸
۴	۱۵۹	۵۵۰	۷۱۶	۱۰۷۴	۰	۶۱.۷۱
۵	۱۵۹	۵۵۰	۷۵۲	۱۰۳۸	۰	۶۰.۹۲
۶	۱۵۹	۵۵۰	۷۸۷	۱۰۰۳	۰	۵۸.۳۷
طرح اختلاط-های همراه میکروسیلیس						
۷	۱۵۹	۵۲۸	۶۸۰	۱۱۱۰	۲۲	۷۲.۸۵
۸	۱۵۹	۵۰۶	۶۸۰	۱۱۱۰	۴۴	۷۵.۳۶
۹	۱۵۹	۴۸۴	۶۸۰	۱۱۱۰	۶۶	۷۶.۴۷

W: آب، C: سیمان، Fin: ماسه، Crass: شن، Sf: میکروسیلیس

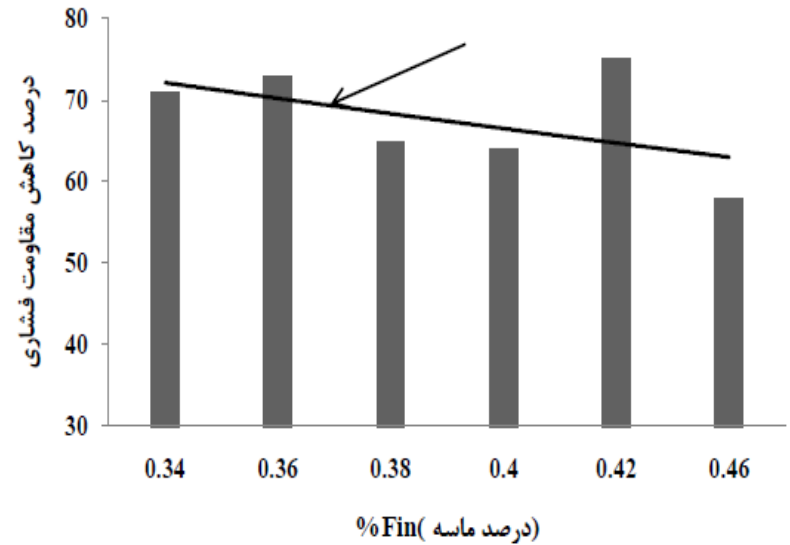
# نتایج درصد کاهش مقاومت و درصد کاهش جرم

طرح اختلاط	درصد کاهش جرم	درصد کاهش مقاومت
طرح اختلاط-های بدون میکروسیلیس		
۱	۷.۹۰	۷۱
۲	۱۱.۸۶	۷۳
۳	۹.۹۷	۶۵
۴	۸.۳۸	۶۴
۵	۲۰.۷۳	۷۵
۶	۱۵.۷۴	۵۸
طرح اختلاط-های همراه میکروسیلیس		
۷	۱۷.۹	۷۶
۸	۱۹.۱۲	۷۹
۹	۱۶.۴۱	۷۳

# تأثیر درصد ماسه

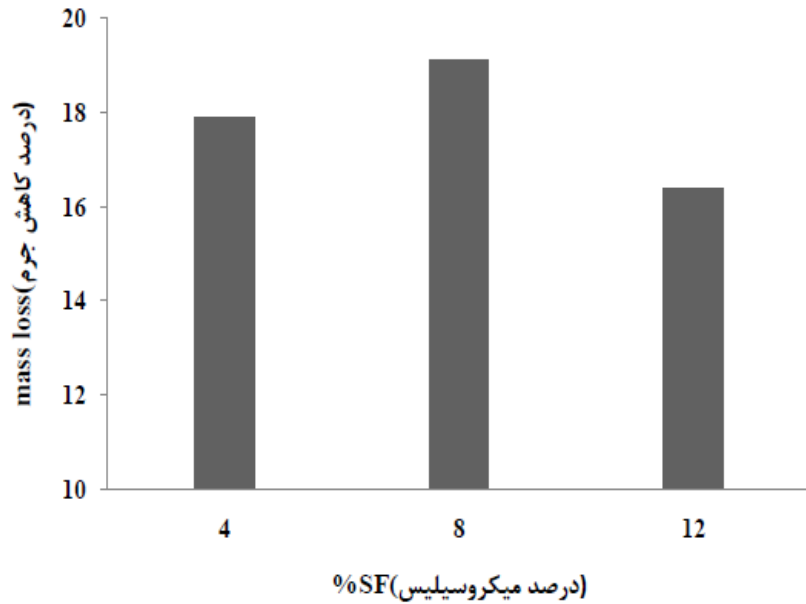


تأثیر درصد ماسه در کاهش جرم بتن‌های بدون میکروسیلیس

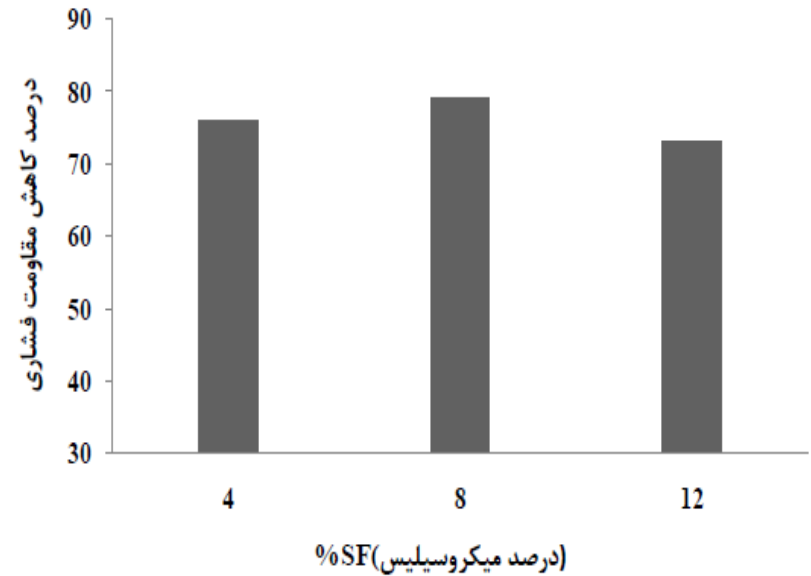


تأثیر درصد ماسه در کاهش مقاومت فشاری بتن‌های بدون میکروسیلیس

# تأثیر میکروسیلیس



تأثیر درصد میکروسیلیس در کاهش جرم بتن



تأثیر درصد میکروسیلیس در کاهش مقاومت فشاری بتن

# بررسی تخریبات فیزیکی

بررسی نوع ترک‌های ایجاد شده در بتن قرار گرفته در برابر حرارت بالا

## ترک‌های سطحی

معمولاً ترک‌های سطحی پیوسته و بیشتر به شکل ترک‌های سوسماری هستند.



# بررسی تخریبات فیزیکی

## ترک‌های محیطی

- معمولاً در نواحی که لایه‌های بتن کوبیده می‌شوند، دیده می‌شوند.
- این ترکها دارای عرض و طول و عمق قابل ملاحظه‌ای هستند. دلیل ایجاد این گونه ترک، وجود آب زیاد در این لایه‌ها می‌باشد که باعث ایجاد فشار بخار بالایی می‌شود که این فشار بالا موجب ایجاد ترک‌هایی با مشخصات گفته شده می‌کند.



ترک‌های محیطی ایجاد شده در لایه‌های یک سوم بالا و پایین



# بررسی تخریبات فیزیکی

## ترک‌های محیطی

در بعضی از نمونه‌ها که این فشار نیرویی بیشتر از مقاومت کششی بتن ایجاد می‌کند، باعث جدا شدن لایه فوقانی (لایه یک سوم بالایی) می‌گردد.



جدا شدن لایه یک سوم فوقانی در اثر فشار بالای بخار

# بررسی تخریبات فیزیکی

## ترکهای ایجاد شده توسط انبساط سنگدانه ها

هنگامی که بتن در معرض حرارت بالا قرار می-گیرد اجزای بتن دچار انبساط می-شوند چون ضریب انبساط حرارتی سنگدانه-ها و خمیر سیمان با هم برابر نیستند انبساط حاصل باعث ایجاد جدا شدگی خمیر سیمان از سنگدانه-ها و ترک-هایی در اطراف سنگدانه-ها می-شود



ترک-های ایجاد شده در اثر اختلاف میان انبساط حرارتی سنگدانه-ها و خمیر سیمان

# بررسی تخریبات فیزیکی

## ترکهای عمیق

چنانچه از نام این ترک-ها مشخص است دارای عمق و عرض زیادی می باشند. شاید بتوان گفت علت آن تاثیر همزمان دو پارامتر فشار بخار و انبساط حرارتی باشد. که تاثیر همزمان این دو پارامتر باعث ایجاد نیروی زیادی در بتن می شود.



# تبخیر شدن آب

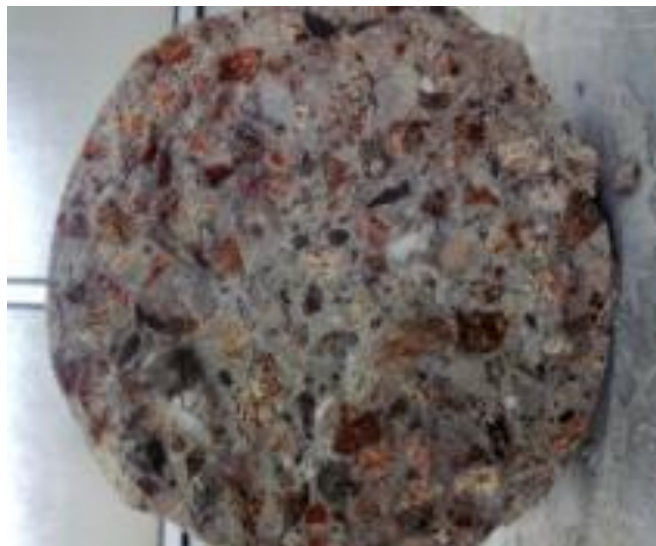
هنگامی که بتن معرض حرارت قرار میگیرد آب درون بتن در سه مرحله تبخیر می شود که به شرح زیر می باشد:

۱. در دمای ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه تبخیر شدن آب سطحی بتن
۲. در دمای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه تبخیر شدن آب آزاد درون بتن
۳. در دماهای بالای ۴۰۰ درجه تبخیر شدن آب شیمیایی بتن

# تغییرات شیمیایی در سنگدانه ها و خمیر سیمان

- هنگامی که سنگدانه-ها در معرض حرارت بالا قرار می-گیرند دچار تغییرات شیمیایی در ساختار خود می-شوند.
- معمولاً این تغییرات شیمیایی در دماهای ۶۰۰ درجه به بالا اتفاق می-افتد.
- در این تحقیق مشاهده شد که هنگامی که سنگدانه-ها بتن در معرض آتش قرار می-گیرند دچار تغییر رنگ می-شوند که این تغییر رنگ نشان از رخ-دادن تغییرات شیمیایی در سنگدانه-ها می-باشد.
- همچنین این تغییر رنگ در خمیر سیمان هم تا اندازه-ای مشاهده شد.

# تغییرات شیمیایی در سنگدانه ها و خمیر سیمان



# انواع Spalling رخ داده در آزمایش ها

در این تحقیق چهار نوع Spalling به نام-های زیر در آزمایشات آتش دیده شد. برای تشخیص وقوع این Spalling-ها از اندازه-گیری تکه-های جدا شده از نمونه-ها استفاده شد.

Spalling سنگدانه-ها

Spalling انفجاری (تکه-هایی با اندازه بزرگتر از ۱ سانتیمتر)

Spalling سطحی (تکه-هایی با اندازه کوچکتر از ۱ سانتیمتر)

Spalling گوشه

Explosive Spalling

# انفجاری Spalling





Surface Spalling

سطحي Spalling



Aggregate Spalling

# سنگدانه Spalling



Corner Spalling

# گوشه Spalling



Corner Spalling

# Spalling ترکیبی



# Spalling های رخ داده در هر طرح اختلاط

طرح- اختلاط	Spalling سطحی	Spalling انفجاری		Spalling گوشه	Spalling سنگدانه
		۱	۲		
۱	x	x	x	√	۱
۲	√	x	√	√	۲
۳	√	x	x	x	۳
۴	√	x	x	x	۴
۵	√	√	√	√	۵
۶	x	√	√	√	۶
۷	√	√	√	√	۷
۸	x	x	√	√	۸
۹	√	x	x	√	۹

# بررسی زمان و دمای وقوع Spalling در آزمایش آتش

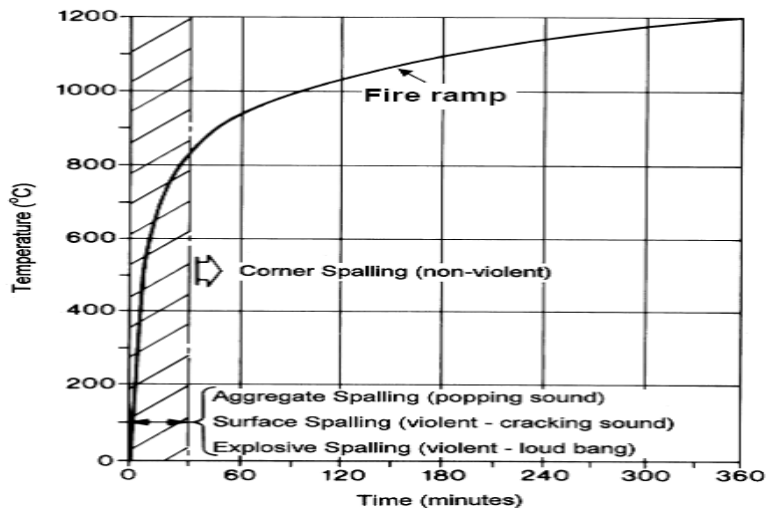
با توجه به این که هنگامی که نمونه‌ها درون کوره بودند و امکان مشاهده آنها در این تحقیق میسر نبود، تنها راه تشخیص زمان وقوع Spalling ثبت صداهای شنیده شده از درون کوره بود. البته قابل ذکر است که این روش روش مناسبی برای ثبت دقیق زمان وقوع Spalling نمی‌باشد ولی تا حدودی می‌توان زمان وقوع دو Spalling سطحی و Spalling انفجاری را مشخص کرد.

در این تحقیق چهار آستانه صدا برای ثبت صداها در نظر گرفته شد. که این آستانه‌ها به شرح زیر می‌باشند:

- ۱. کم
- ۲. متوسط
- ۳. زیاد
- ۴. خیلی زیاد

در این تحقیق دو آستانه کم و متوسط نشان از Spalling سطحی و دو آستانه زیاد و خیلی زیاد نشان از Spalling انفجاری در نظر گرفته شد.

# بررسی زمان و دمای وقوع Spalling در آزمایش آتش



## بررسی زمان و دمای وقوع Spalling در آزمایش آتش

- در دماهای بالاتر از ۶۸۰ درجه و حتی زمانی که نمونه در دمای ۸۰۰ درجه به مدت یک ساعت بود، هیچ صدایی شنیده نشد و این مشخص می‌کند که در دماهای بالاتر هیچ Spalling انفجاری و سطحی رخ نمی‌دهد، که این نتیجه‌ای است که دیگر محققین در آزمایشات خود به آن رسیده‌اند.
- در دماهای بالاتر تنها Spalling سنگدانه‌ها می‌باشد که با افزایش دما متوقف نمی‌شود زیرا هنگامی که نمونه دارای سطحی با دمایی بالا است دمای داخل نمونه به مراتب کمتر از دمای سطح است.



## بررسی زمان و دمای وقوع Spalling در آزمایش آتش

- با افزایش زمان حرارت دهی، دمای داخل نمونه افزایش می‌یابد، این افزایش دما موجب Spalling سنگدانه‌ها می‌شود. البته دمای سنگدانه‌ها باید به دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد برسد.

- علت این که در دماهای بالاتر Spalling سطحی و انفجاری رخ نمی‌دهد؟

این است که در دماهای بالاتر دمای داخل نمونه به دمای تبخیر آب رسیده است اما در دماهای پایین‌تر این Spalling‌ها رخ داده‌اند و در اثر این Spalling‌ها در بتن ترک‌هایی ایجاد می‌شود که موجب فرار بخار آب در لایه‌های بعدی می‌شوند و در نتیجه فشار بخار ایجاد شده بسیار کم می‌شود.

# روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

از جمله دلایل کاهش مقاومت بتن-های با مقاومت بالا در برابر آتش (حرارت بالا) می-توان به دو دلیل زیر اشاره نمود.

۱. تبخیر شدن آب شیمیایی بتن

۲. رنج دادن پدیده Spalling

۳. کاهش مقاومت سنگدانه-ها

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

# مبانی طراحی سازه ها در برابر حریق



# عملکرد فولاد و بتن مسلح در برابر حریق

## موضعی و گسترده

- بتن در مقایسه با فولاد عایق بهتری نسبت به گرما می باشد. بنابراین در هنگام آتش سوزی، فولاد حرارت را در بخش وسیع تری پخش می کند.
- از این رو تا زمانی که آتش بخش وسیع تری را فرا نگرفته است، دمای قاب های فولادی کمتر از دمای آتش خواهد بود.
- اما برای سازه های بتن مسلح، گرما می تواند منجر به پوسته پوسته شدن و شکست بتن گردد و به صورت موضعی آسیب به سازه بتنی وارد کند.
- آتش تنها در صورتیکه بسیار فراتر از دمای فولاد شود می تواند باعث شکست سازه ی فولادی گردد.

## The Windsor Building Fire, February ۱۲, ۲۰۰۵

- در شب ۱۲ فوریه سال ۲۰۰۵، در ساختمان ۳۲ طبقه ی بتن مسلح Windsor در شهر مادرید اسپانیا آتش سوزی مهیبی رخ داد.
- این آتش سوزی که تقریباً یک روز به طول انجامید، و بیش از ۱۰۰ آتش نشان در تلاش برای مهار شعله های غیر قابل کنترل آتش و جلوگیری از سرایت آنها به ساختمان های اطراف بودند.
- در طول شب، ساختمان تکه تکه شده و قطعات آن به زمین پرتاب می شد. آتش سوزی باعث فرو ریختن دهانه های ۱۰ طبقه بالایی شد.
- گزارشات حاکی از آن بود که احتمال فروریزش کل سازه وجود دارد که البته چنین اتفاقی رخ نداد.

# تصاویر مربوط به ساختمان Windsor

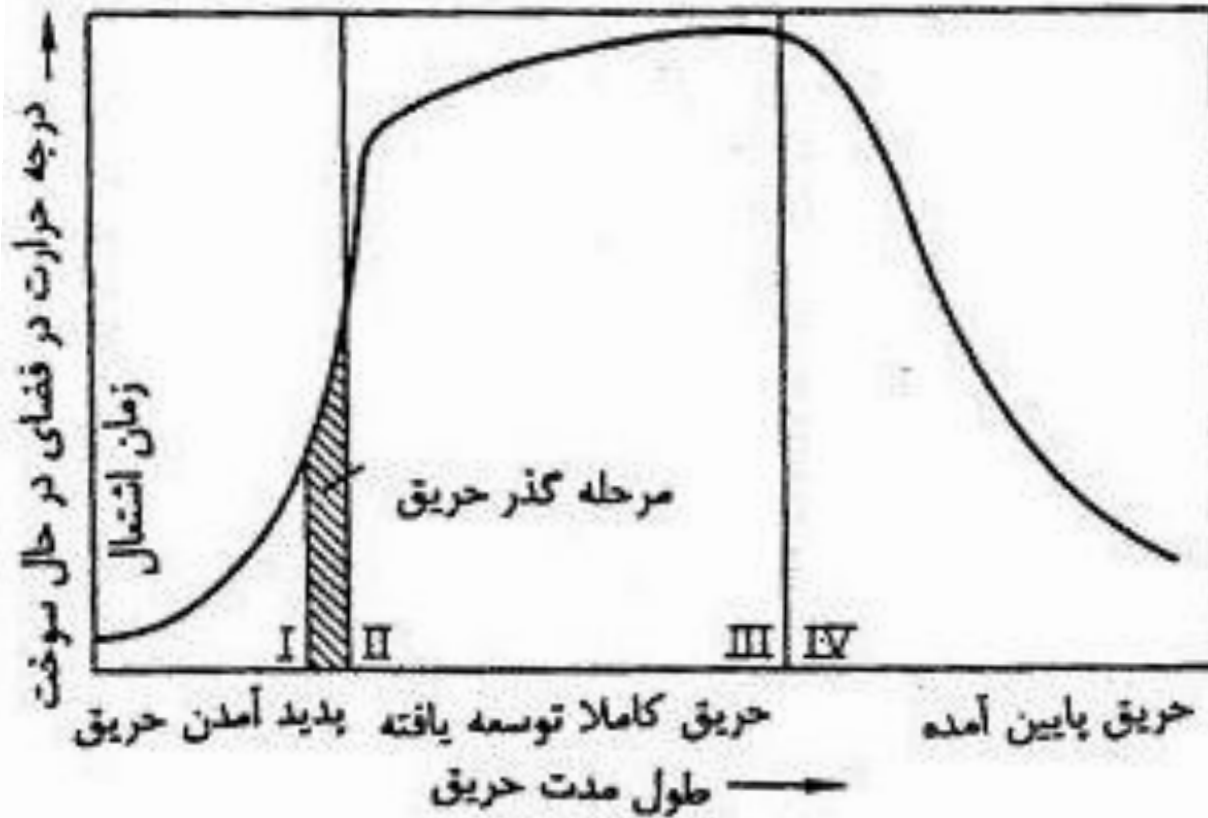


مبانی طراحی سازه ها در برابر مریق

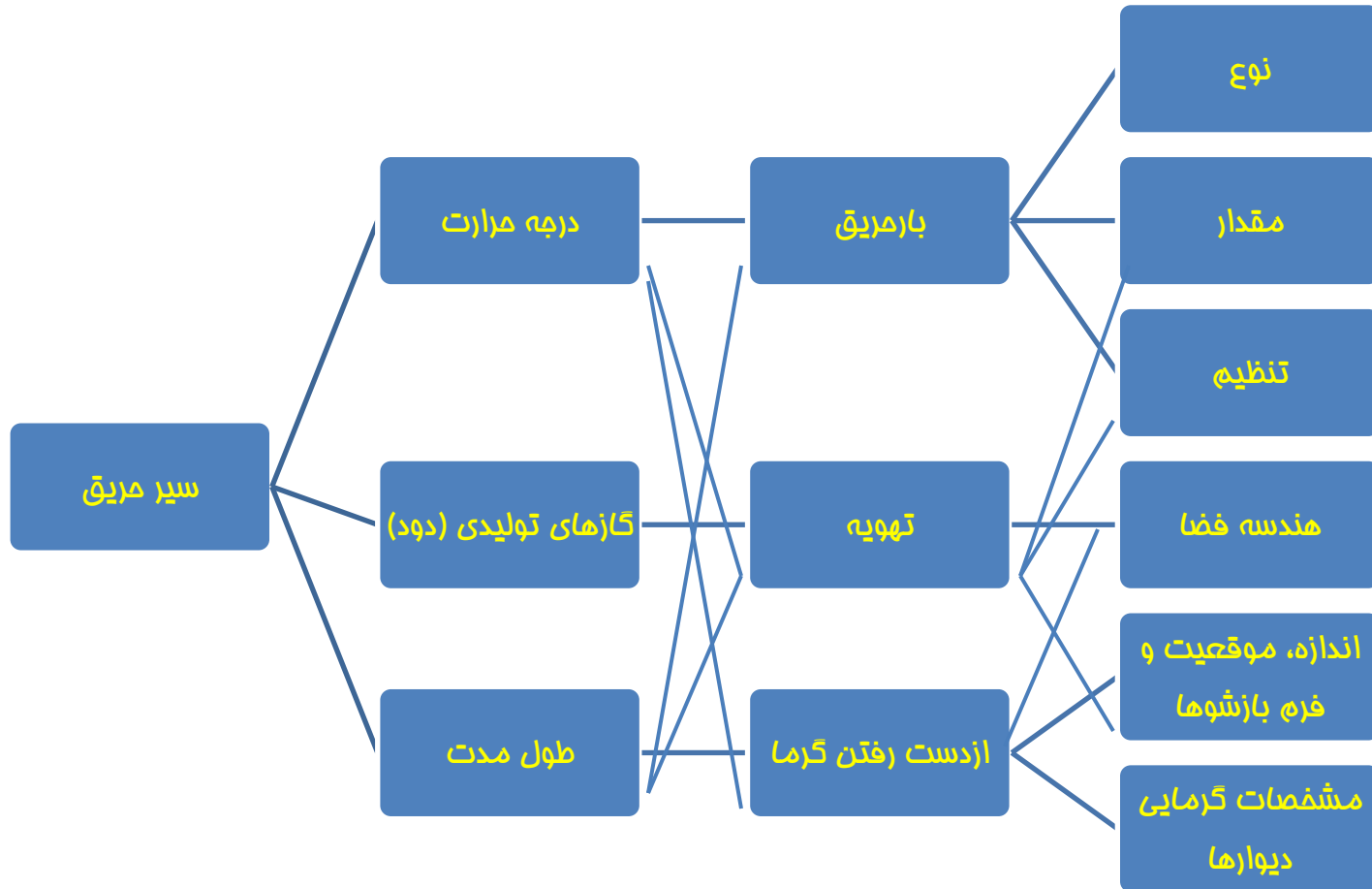


**بار حریق و طول زمان حریق هم ارز**

# فاز های سیر حریق



# پارامترهای موثر در سیر حریر



# پارامترهای موثر در سیر حریق

از بین پارامترهای اشاره شده دو پارامتر زیر اثر بیشتری در سیر حریق دارند

□ بزرگی بار حریق

□ نوع و گستره هواکش (تهویه)

# هدف اصلی در مطالعات حریق در سازه ها

طراحی سازه و قطعات آن و تامین مقاومت کافی در طول زمان حریق به منظور کاهش ناتوانی موضعی و کلی و جلوگیری از فروپاشی ساختمان یا قطعات آن.

# معیار مناسب جهت این طراحی

تعیین مدت زمان لازم جهت مقاومت قطعات ساختمانی در برابر حریق و مقایسه آن با مقادیر زمانی قابل حصول جهت حفظ مقاومت در مصالح مختلف سازه.

$$erf.F \leq F_u$$

نیاز

طبق DIN ۴۱۰۲

# تعیین طول مدت زمان مورد نیاز جهت مقاومت

$$erf.F = t_{ae} \cdot \gamma \cdot \gamma_{nb}$$

در این رابطه:

$t_{ae}$ : طول مدت حریق هم ارز (مدت زمان لازم برای رسیدن دمای المان به دمای محیط تحت حریق

طبیعی)

$\gamma$ : فاکتور قابلیت اطمینان

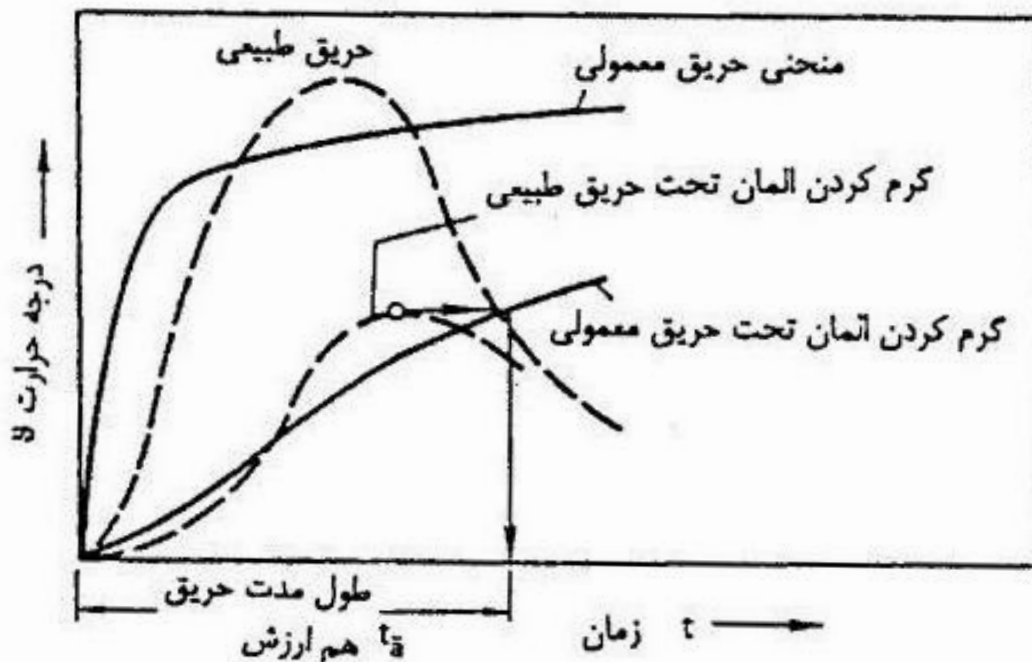
$\gamma_{nb}$ : فاکتور تصحیح (در نظر گرفتن اثرات وجود اطفای حریق یا وجود یک ایستگاه آتشنشانی

شناخته شده)

# تعیین طول مدت حریق هم ارز (هم ارزش)

نمودار زیر نشان می‌دهد حریق طبیعی و حریق مصنوعی (معمولی) تاثیرات

متفاوتی در افزایش درجه حرارت محیط یا المان ها دارد.

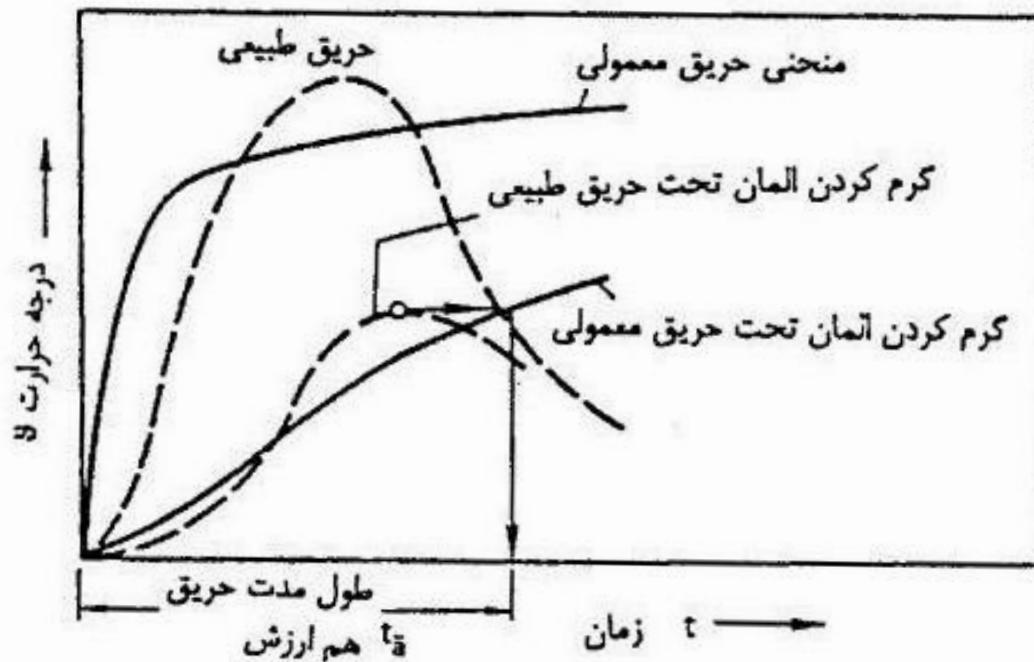




# تعیین طول مدت حریق هم ارز

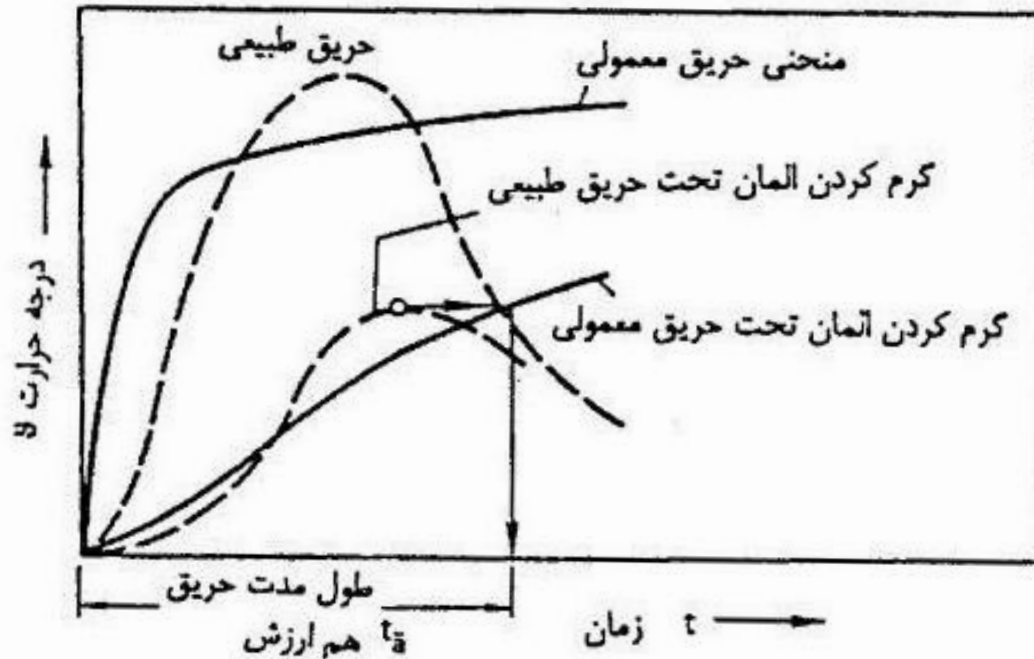
از طرفی داده های آزمایشگاهی جمع آوری شده عموماً از آزمایش مصالح

بر اساس حریق مصنوعی (معمولی) حاصل می شود.



# تعیین طول مدت حریق هم ارز

بنابراین محل تلاقی نمودار اثر حریق مصنوعی (معمولی) بر آلمان با نمودار اثر حریق طبیعی بر محیط نشان دهنده طول مدت حریق هم ارز خواهد بود.



# پارامترهای موثر بر طول مدت حریق هم ارز $t_{ae}$

۱- بار حریق (q)

۲- فاکتور سوختن (m)

۳- فاکتور کاهش گرما (w)

# رابطه سازی طول مدت حریق هم ارز

$$t_{ae} = Cq_R = C.q.w.m$$

در این رابطه:

$t_{ae}$ : طول مدت حریق هم ارز

$C$ : فاکتور تبدیل بار محاسباتی به طول مدت حریق هم ارز

$q_R$ : بار محاسباتی حریق

$q$ : بار حریق

$w$ : فاکتور کاهش گرما

$m$ : فاکتور سوختن

# محاسبات بار حریق

$$q = \frac{\sum Mi \cdot \sum Hui}{A} = \frac{\sum Qi}{A}$$

در این رابطه:

Mi: جرم مواد آتش زا

Hui: ضریب گرمای مواد آتش زا

Qi: مجموع همه مقادیر گرما بخش (KWh)

A: مساحت تحت حریق بر حسب مترمربع

# روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

- معروف ترین و پر کاربردترین منحنی اسمی آتش سوزی، که به اصطلاح منحنی استاندارد نامیده می شود در همه ی آیین نامه های اروپایی و آیین نامه های استاندارد (BSI, ۱۹۸۷, ۱۹۹۹; ISO, ۱۹۷۵) موجود می باشد.
- منحنی استاندارد آتش بر اساس مواد مختلف (به عنوان مثال چوب / کاغذ / پارچه) طراحی شده اند و از معادله ی زیر قابل محاسبه می باشند:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

# منحنی استاندارد طراحی سازه ها در برابر حریق

- در حالی که منحنی استاندارد ماهیت انتقالی پیشرفت آتش را در برمی گیرد، رابطه مستقیمی میان عملکرد در تست استاندارد و طول مدت آتش واقعی دیده نمی شود.
- این منبع و منشایی از سردرگمی است همان گونه که بسیاری از شاهدین معتقدند که ۶۰ دقیقه مقاومت آتش به معنی اینست که المان سازه ای برای ۶۰ دقیقه در یک آتش حقیقی نجات می یابد.
- در حقیقت المان سازه ممکن است به طور رضایت بخشی بسته به شدت آتش و مدت آتش برای مدتی طولانی تر یا کوتاه تر عمل کند.

# منحنی استاندارد طراحی سازه ها در برابر حریق

- دمای داخل کوره نسبت به دمای میان اجزای آتش حقیقی یکنواخت تر است.
- برای فرم های خاصی از سازه ها درمیان یک آتش واقعی، یک اثر شعله مستقیم شاید پیامدهای مهمی را داشته باشد که در یک آزمون استاندارد نمی توان آن را دید.
- مروری کلی بر نتایج بدست آمده از آزمون استاندارد و در حالت کلی، کاربرد مقادیر جدول بندی شده، دانش ما را در خصوص رفتار دقیق سازه در هنگام آتش سوزی از بین برده است.
- مهندسی سازه در برابر حریق با هدف ایجاد اعتماد در آیین نامه ها و راهنماها (هرجایی که مناسب است) بنا شده است. از دیگر اهداف این رشته افزایش و ارتقا ویژگی های فیزیکی اعضای سازه ای است تا بتوانند طول عمر و تحمل بالاتری در هنگام حریق داشته باشند.



# سایر منحنی ها

منحنی خروجی حریق برای حالتی است که المان یا عضو سازه در معرض حرارتی است که از روزنه ها و بازشوهای ساختمان وارد می شود. این حالت نسبت به شرایطی که این اتفاق از داخل رخ می دهد، خفیف تر است:

$$\theta_g = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + 20$$

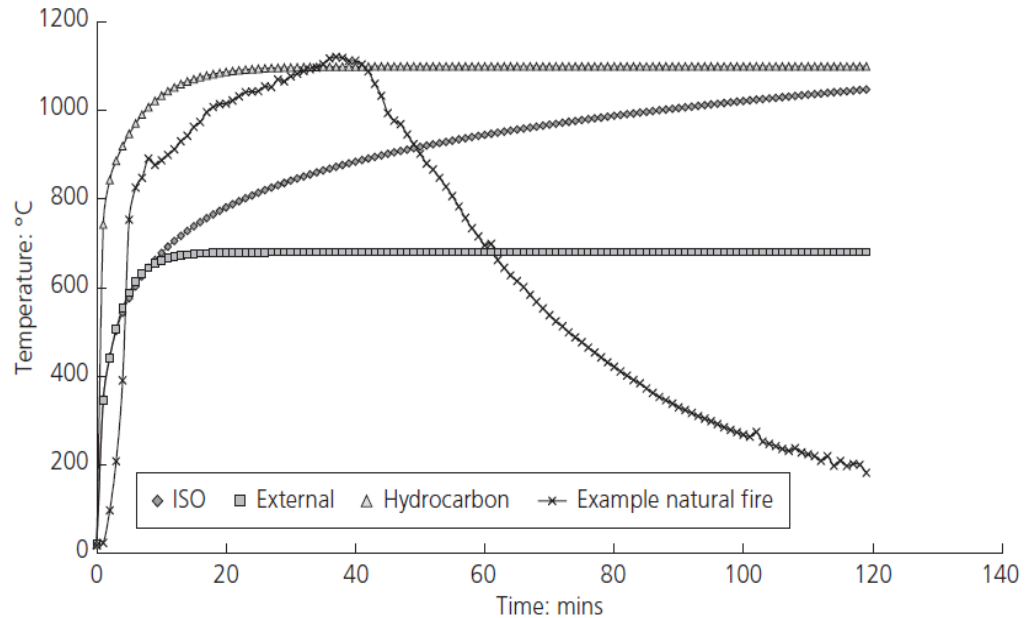
در مواقعی که مقادیر حرارتی (گرمزایی) بار آتش بطور چشمگیری بالاتر از منحنی های معیار است، مانند صنایع پتروشیمی یا مناطق ساحلی، استفاده از منحنی هیدروکربنی آتش مناسب ترین منحنی در میان تمام منحنی های اسمی حریق می باشد. تعدادی از این منحنی ها در دسترس می باشد: پر کاربردترین این منحنی ها در بخش (BSI, 2002b) آیین نامه ی اروپا آورده شده است

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20$$

# سایر منحنی ها

برای المان های **محافظ در برابر آتش**، ممکن است انجام آزمایشات در شرایطی که آتش در حال وقوع است باعث ایجاد ناهمگونی و رفتار متفاوتی شود.  
در چنین شرایطی یک منحنی حرارتی **خفیف** مورد استفاده قرار می گیرد:

$$\theta_{eg} = 154t^{0.25} + 20$$



# منحنی برای تونل ها

- در سال های اخیر آتش سوزی های که در داخل تونل ها رخ داده است خساراتی شدید و غیر قابل جبران بر جای گذاشته است.
- در چنین مواردی، منحنی دقیق تری نسبت به منحنی هیدروکربنی آتش به منظور شبیه سازی اثر حریق بر تانکرهای عظیم بنزین در یک فضای محدود و کوچک لازم است.
- دقیق ترین منحنی با نام منحنی RWS در کشور هلند ارائه شده است که تا دمای ۱۳۵۰ درجه سلسیوس را پوشش می دهد.
- منحنی های دیگر از جمله منحنی موجود در آیین نامه ی RABT آلمان تنها تا دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس را پوشش می دهند.

# فلسفه طراحی

- روش سنتی
- روش طراحی بر اساس عملکرد

# آزمایشگاه بارگذاری آتش

- آزمایش نمونه های مصالح
- آزمایش المانهای سازه
- آزمایش کل سازه

# مدل های مقاومت فشاری موجود

Reference	Compressive strength at elevated temperatures (unstressed tests)
Lie and Lin (1985)	$f'_{cT} = f'_c \left( 2.011 - 2.353 \frac{T-20}{1000} \right) \leq f'_c$
Lie et al. (1986)	$f'_{cT} = f'_c (1 - 0.001 T) \quad T \leq 500^\circ C$ ; $f'_{cT} = f'_c (1.375 - 0.00175 T) \quad 500^\circ \leq T \leq 700^\circ C$ ; $f'_{cT} = 0 \quad T \geq 700^\circ C$
BS EN 1992-1-2 (2004)	$f'_{cT} = f'_c \quad T \leq 100^\circ C$ ; $f'_{cT} = f'_c (1.067 - 0.00067 T) \quad 100^\circ C \leq T \leq 400^\circ C$ ; $f'_{cT} = f'_c (1.44 - 0.0016 T) \quad T \geq 400^\circ C$
ASCE Manual (1992)	$f'_{cT} = f'_c \quad 20^\circ \leq T \leq 450^\circ C$ ; $f'_{cT} = f'_c \left[ 2.011 - 2.353 \left( \frac{T-20}{1000} \right) \right] \quad 450^\circ \leq T \leq 874^\circ C$ ; $f'_{cT} = 0 \quad T > 874^\circ C$
Lie and Irwin (1993)	$f'_{cT} = f'_c \quad 0^\circ C \leq T < 450^\circ C$ ; $f'_{cT} = f'_c (2.06 - (T/425)) \quad T \geq 450^\circ C$
Chang (advisor Jau) (2001)	$f'_{cT} = (1 - 0.001 T) f'_c \quad 0^\circ C \leq T \leq 500^\circ C$ ; $f'_{cT} = \left[ 1.6046 + (1.37 T^2 - 2817 T) \times 10^{-6} \right] f'_c \quad T > 500^\circ C$
Kodur et al. (2001)	$f'_{cT} = \left\{ \begin{array}{ll} f'_c [1.0 - 0.003125 (T - 20)] & T < 100^\circ C \\ 0.75 f'_c & 100^\circ C \leq T \leq 400^\circ C \\ f'_c [1.33 - 0.00145 T] & 400^\circ C < T \end{array} \right\}$
Li and Purkiss (2005)	$f'_{cT} = f'_c \left( 0.00165 \left( \frac{T}{100} \right)^3 - 0.03 \left( \frac{T}{100} \right)^2 + 0.025 \left( \frac{T}{100} \right) + 1.002 \right)$
Hertz (2005)	$f'_{cT} = f'_c \left[ 1 / \left( 1 + \frac{T}{T_1} + \left( \frac{T}{T_2} \right)^2 + \left( \frac{T}{T_8} \right)^8 + \left( \frac{T}{T_{64}} \right)^{64} \right) \right]$ <b>Siliceous aggregate:</b> $T_1 = 15000, T_2 = 800, T_8 = 570, T_{64} = 100000$ <b>Lightweight aggregate:</b> $T_1 = 100000, T_2 = 1100, T_8 = 800, T_{64} = 940$ <b>Other aggregates:</b> $T_1 = 100000, T_2 = 1080, T_8 = 690, T_{64} = 1000$
Chang et al. (2006)	1. $f'_{cT} = f'_c \left( 1.008 + \frac{T}{450 \ln(T/5800)} \right) \geq 0.0 \quad 20^\circ C < T \leq 800^\circ C$ ; 2. $f'_{cT} = f'_c \left\{ \begin{array}{ll} 1.01 - 0.00055 T & 20^\circ C < T \leq 200^\circ C \\ 1.15 - 0.00125 T & 200^\circ C \leq T \leq 800^\circ C \end{array} \right\}$

# مدل های مقاومت فشاری ارائه شده

NSC

$$f'_{cT} = f'_c \left[ \begin{array}{ll} 1.012 - 0.0005T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ 0.985 + 0.0002T - 2.235 \times 10^{-6}T^2 + 8 \times 10^{-10}T^3 & 100^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \\ 0.44 - 0.0004T & 900^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T > 1000^\circ\text{C} \end{array} \right] \quad (1)$$

HSC (siliceous aggregate)

$$f'_{cT} = f'_c \left[ \begin{array}{ll} 1.01 - 0.00068T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \\ 0.935 + 0.00026T - 2.13 \times 10^{-6}T^2 + 8 \times 10^{-10}T^3 & 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ 0.90 + 0.0002T - 2.13 \times 10^{-6}T^2 + 8 \times 10^{-10}T^3 & 400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \\ 0.44 - 0.0004T & 900^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T > 1000^\circ\text{C} \end{array} \right] \quad (2)$$

$$55.2 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 80 \text{ MPa}$$

# مدل های مقاومت فشاری ارائه شده انواع بتن

$$f'_{cT} = f'_c \left[ \begin{array}{ll} 0.8 - 0.0005T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \\ 0.96 - 0.0008T - 5.17 \times 10^{-7}T^2 + 4 \times 10^{-10}T^3 & 500^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \\ 0.44 - 0.0004T & 800^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T > 1000^\circ\text{C} \end{array} \right] \quad (3)$$

$80 \text{ MPa} < f'_c \leq 110 \text{ MPa}$

## Calcareous aggregate concrete

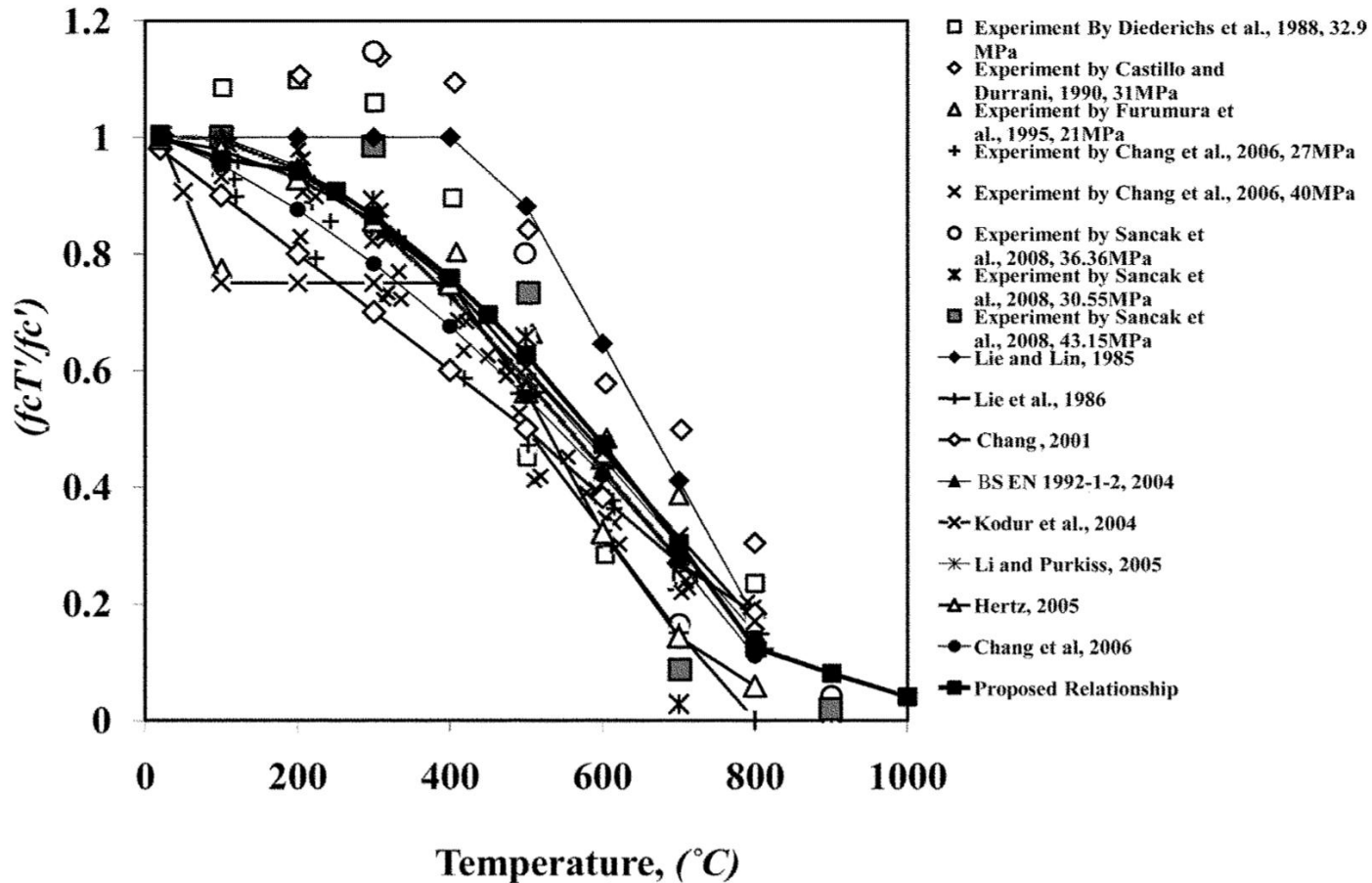
$$f'_{cT} = f'_c \left[ \begin{array}{ll} 1.01 - 0.0006T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C} \\ 1.0565 + 0.0017T + 5 \times 10^{-6}T^2 - 5 \times 10^{-9}T^3 & 200^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\ 0 & 900^\circ\text{C} < T \end{array} \right] \quad (4)$$

## Lightweight aggregate concrete

$$f'_{cT} = f'_c \left[ \begin{array}{ll} 1.01 - 0.00037T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.0491 - 0.00036T + 10^{-6}T^2 - 2 \times 10^{-9}T^3 & 300^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\ 0 & T \geq 1000^\circ\text{C} \end{array} \right] \quad (5)$$

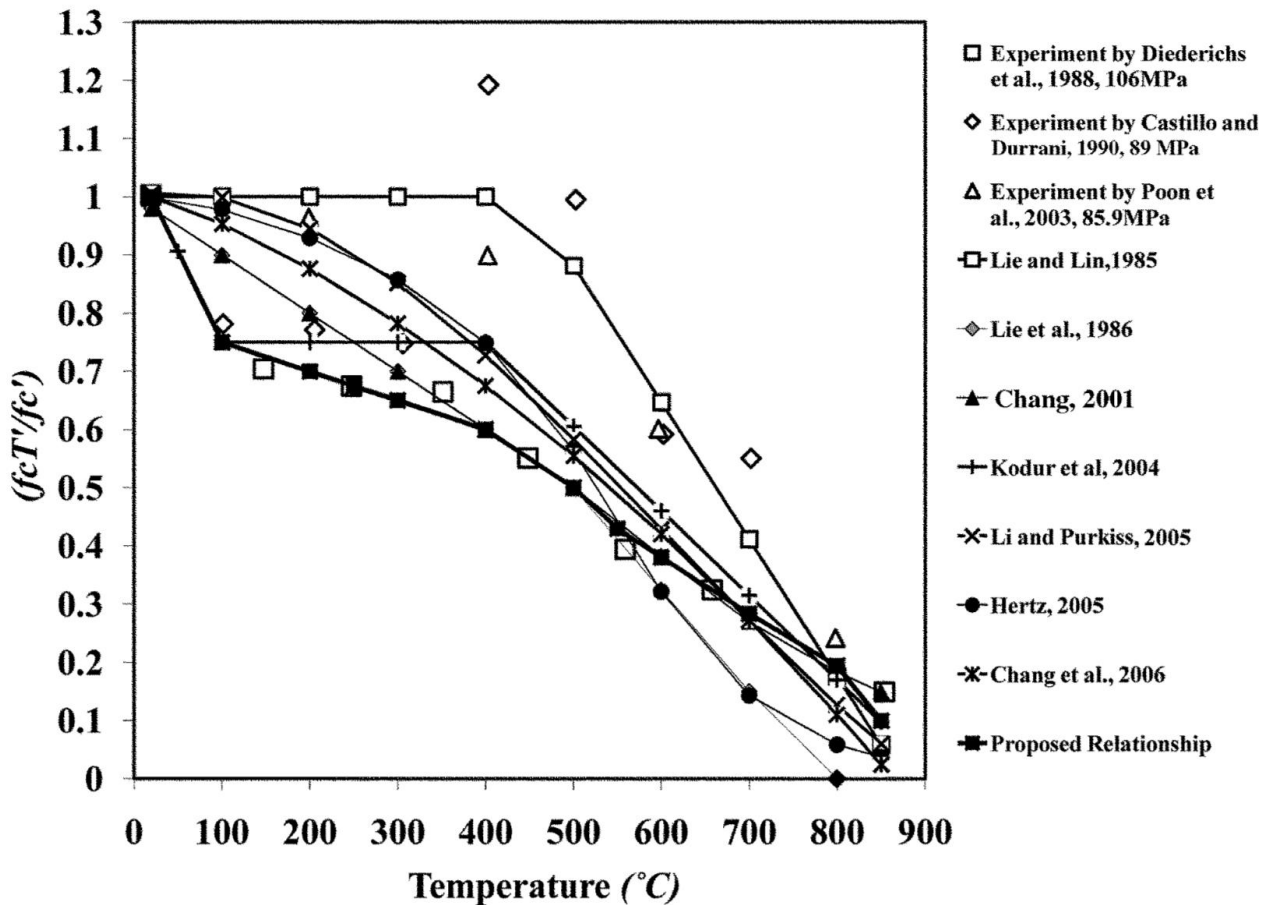


# بتن معمولی





# مقاومت بالا ۸۰-۱۱۰ مگاپاسکال



# مدل های مقاومت کششی ارائه شده

$$f_{crT} = \quad (6)$$
$$f_{cr} \left[ \begin{array}{ll} 1.02 - 0.00098T \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \\ 0.965 - 0.0001T - 9 \times 10^{-7}T^2 - 3 \times 10^{-9}T^3 + 3.2 \times 10^{-12}T^4 & 300^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\ 0 & T \geq 1000^\circ\text{C} \end{array} \right]$$

# مدل های مقاومت کششی موجود

Reference	Tensile strength at elevated temperatures (unstressed tests)
Bažant and Chern (1987)	$f_{crT} = f_{cr} \begin{cases} -0.000526 T + 1.01052 & 20^\circ C \leq T \leq 400^\circ C \\ -0.00252 T + 1.8 & 400^\circ C \leq T \leq 600^\circ C \\ -0.0005 T + 0.6 & 600^\circ C \leq T \leq 1000^\circ C \end{cases}$
BS EN 1992-1-2 (2004)	$k_{ck,t} = \begin{cases} 1 & 20^\circ C \leq T \leq 100^\circ C \\ 1 - (T - 100) / 500 & 100^\circ C < T \leq 600^\circ C \end{cases} f_{crT} = k_{ck,t} f_{cr}$
Terro (1998)	$f_{crT} = f_{cr} \left( f'_{cT} / f'_c \right); \quad f_{cr} = \left( f'_c / 10 \right)$
Li and Guo (reported in Xiao and Konig 2004)	$f_{crT} = f_{cr} (1 - 0.001 T) \quad 20^\circ C \leq T \leq 1000^\circ C$
Chang et al. (2006)	$f_{crT} = f_{cr} \begin{cases} 1.05 - 0.0025 T & 20^\circ C \leq T \leq 100^\circ C \\ 0.80 & 100^\circ C < T \leq 200^\circ C \\ 1.02 - 0.0011 T \geq 0.0 & 200^\circ < T \leq 800^\circ C \end{cases}$

Notes: 1 MPa = 145 psi;  $T (^{\circ}F) = 1.8T (^{\circ}C) + 32$ .

# مدل مدول الاستیسیته ارائه شده

$$E_{crT} = E_c \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T < 100^\circ\text{C} \\ 1.015 - 0.00154T + 2 \times 10^{-7}T^2 + 3 \times 10^{-10}T^3 & 100^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T > 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

# مدل مدول الاستیسیته موجود

Reference	Compressive elastic modulus at elevated temperatures (unstressed tests)
Anderberg and Thelandersson (1976)	$E_{crT} = 2f_{cT}' / \epsilon_{cT}'$
BSI (1985)	$E_{crT} = (700 - T / 550)E_c \leq E_c$
Schneider (1986)	<p>Normalweight concrete:  <math>E_{crT} = (-0.001552 T + 1.03104) g E_c \quad 20^\circ C \leq T \leq 600^\circ C</math>  <math>E_{crT} = (-0.00025 T + 0.25) g E_c \quad 600^\circ C \leq T \leq 1000^\circ C</math></p> <p>Lightweight concrete:  <math>g = 1 + \frac{f_{ci}}{f_c} \frac{T - 20}{100} ; \frac{f_{ci}}{f_c} \leq 3.0 \quad E_{crT} = (-0.00102 T + 1.0204) g E_c \quad 20^\circ C \leq T \leq 1000^\circ C</math></p>
Khennane and Baker (1993)	<p>for preloaded concrete : <math>E_{crT} = (-0.000634 T + 1.012673) E_c</math> if <math>20^\circ C \leq T \leq 525^\circ C</math>  <math>E_{crT} = (-0.002036 T + 1.749091) E_c</math> if <math>525^\circ C \leq T \leq 800^\circ C</math>  for unloaded concrete : <math>E_{crT} = (-0.001282 T + 1.025641) E_c</math> if <math>20^\circ C \leq T \leq 800^\circ C</math></p>
Lu (reported in Xiao and Konig 2004)	$E_{crT} = (1 - 0.0015 T) E_c \quad 20^\circ C \leq T \leq 200^\circ C ; E_{crT} = (0.87 - 0.00084 T) E_c \geq 0.28 E_c$
Li and Guo (reported in Xiao and Konig 2004)	$E_{crT} = (0.83 - 0.0011 T) E_c \quad 60^\circ C \leq T \leq 700^\circ C \quad E_{crT} = E_c \quad 20^\circ C \leq T \leq 60^\circ C$
Li and Purkiss (2005)	$E_{crT} = (800 - T / 740) E_c \leq E_c$
Chang et al. (2006)	<ol style="list-style-type: none"> <li><math>E_{crT} = \begin{cases} -0.00165 T + 1.033 &amp; 20^\circ C &lt; T \leq 125^\circ C \\ 1 / (1.2 + 18(0.00157)^{4.5}) &amp; 125^\circ C &lt; T \leq 800^\circ C \end{cases} E_c</math></li> <li><math>E_{crT} = (-0.00165 T + 1.033) E_c \quad 20^\circ C &lt; T \leq 600^\circ C</math></li> </ol>

Notes: 1 MPa = 145 psi;  $T$  (°F) =  $1.8T$  (°C) + 32.

# مدل رفتاری (رابطه تنش-کرنش فشاری) ارائه شده

$$\frac{\sigma_{cT}}{f'_{cT}} = \frac{\beta_{mT} \left( \frac{\varepsilon_{cT}}{\varepsilon_{max}} \right)}{\beta_{mT} - 1 + \left( \frac{\varepsilon_{cT}}{\varepsilon_{max}} \right)^{\beta_{mT}}}; \quad (8)$$

$$\beta_{mT} = \beta_{mT, a}(\text{fitted}) = [1.02 - 1.17(E_p/E_c)]^{-0.74} \text{ if } \varepsilon_{cT} \leq \varepsilon_{max}$$

$$\beta_{mT} = \beta_{mT, d}(\text{fitted}) = \beta_{mT, a}(\text{fitted}) + (a + 28b) \text{ if } \varepsilon_{cT} \geq \varepsilon_{max}$$

$$b = 0.83 \exp(-911/f'_{cT}) \quad a = 2.7 \times (12.4 - 1.66 \times 10^{-2} f'_{cT})^{-0.46}$$



# مدل رفتاری (رابطه تنش- کرنش کششی) ارائه شده

$$f_{ctT} = \begin{cases} f_{crT} E_c & \varepsilon_{cT} \leq \varepsilon_{ctT}' \\ f_{crT} (\varepsilon_{ctT}' / \varepsilon_{cT}')^{0.75} & \varepsilon_{cT} > \varepsilon_{ctT}' \end{cases} \quad (9)$$

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق



روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

روش های طراحی سازه ها در برابر حریق

**با تشکر از توجه شما**