

# مشخصات مصالح در دمای بالا بتن

|                                        |              |       |       |            |             |                                 |     |
|----------------------------------------|--------------|-------|-------|------------|-------------|---------------------------------|-----|
| محل ضرب<br>مهرهای تحت<br>کنترل - منسوخ |              |       |       |            |             |                                 | ۰۳  |
|                                        |              |       |       |            |             |                                 | ۰۲  |
|                                        |              |       |       |            |             |                                 | ۰۱  |
|                                        |              |       |       | امیر ساعدی | وحید پاچیده | مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن | ۰۰  |
|                                        | تاریخ انتشار | تصویب | تأیید | بررسی      | تهیه        | شرح                             | REV |

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۲                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

## فهرست مطالب

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| ۱- ویژگی های مصالح بتن .....                                          | ۳  |
| ۱-۱- چگالی .....                                                      | ۳  |
| ۲-۱- گرمای ویژه .....                                                 | ۴  |
| ۳-۱- هدایت گرمایی .....                                               | ۵  |
| ۴-۱- پخش گرمایی .....                                                 | ۷  |
| ۲- مشخصه های مقاومتی بتن .....                                        | ۸  |
| ۱-۲- داده های تنش - کرنش .....                                        | ۸  |
| ۲-۲- خزش .....                                                        | ۱۲ |
| ۳-۲- انبساط گرمایی آزاد .....                                         | ۱۲ |
| ۴-۲- آزمایش های ناپایدار .....                                        | ۱۴ |
| ۵-۲- مقاومت کششی بتن در دمای بالا .....                               | ۱۶ |
| ۶-۲- مقاومت پیوستگی .....                                             | ۱۶ |
| ۷-۲- بتن های پر مقاومت (HSC) و خود متراکم (SCC) .....                 | ۱۷ |
| ۱-۷-۲- بتن با عملکرد بالا .....                                       | ۱۷ |
| ۲-۷-۲- بتن خود متراکم .....                                           | ۲۰ |
| ۸-۲- بتن الیافی .....                                                 | ۲۱ |
| ۱-۸-۲- بتن با الیاف فولاد .....                                       | ۲۱ |
| ۲-۸-۲- بتن های باز تولیدی و بتن فیبردار با دوغاب نفوذی (SIFCON) ..... | ۲۳ |
| ۹-۲- رفتار چند محوری .....                                            | ۲۴ |

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۳                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

## ۱- ویژگی های مصالح بتن

در بتن برخلاف فولاد، شرایط به مراتب پیچیده تر خواهد بود، چرا که پارامترهای گرمایی مورد نیاز به طرح اختلاط بتن، نوع سنگدانه، میزان رطوبت اصلی بتن، و سن بتن وابسته هستند. بنابراین داده هایی که در این بخش ارائه می شوند می توانند تنها به عنوان نماینده ای برای بتن های خاص مورد استفاده قرار گیرند.

### ۱-۱- چگالی

اگرچه هنگامی که بتن حرارت می بیند، بخشی از آب آزاد و آب موجود در آن تبخیر شده و در نتیجه وزن آن کاهش می یابد، اما این کاهش وزن در حدی نیست که تغییرات اساسی در چگالی ایجاد کند و بنابراین چگالی بتن را می توان با دقت خوبی برابر چگالی آن در شرایط عادی در نظر گرفت. البته EN 1992-1-2 پیشنهاد می کند که تغییر دما در محاسبات گرمایی به صورت زیر بکار گرفته شود:

$$20^{\circ}C \leq \theta_c \leq 115^{\circ}C \quad \text{برای}$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^{\circ}) \quad (۱)$$

$$115^{\circ}C \leq \theta_c \leq 200^{\circ}C \quad \text{برای}$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^{\circ}C) \left( 1 - 0.02 \frac{\theta_c - 115}{85} \right) \quad (۲)$$

$$200^{\circ}C \leq \theta_c \leq 400^{\circ}C \quad (13.5) \quad \text{برای}$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^{\circ}C) \left( 0.98 - 0.03 \frac{\theta_c - 200}{200} \right)$$

$$400^{\circ}C \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}C \quad \text{برای}$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^{\circ}C) \left( 0.95 - 0.07 \frac{\theta_c - 400}{800} \right) \quad (۳)$$

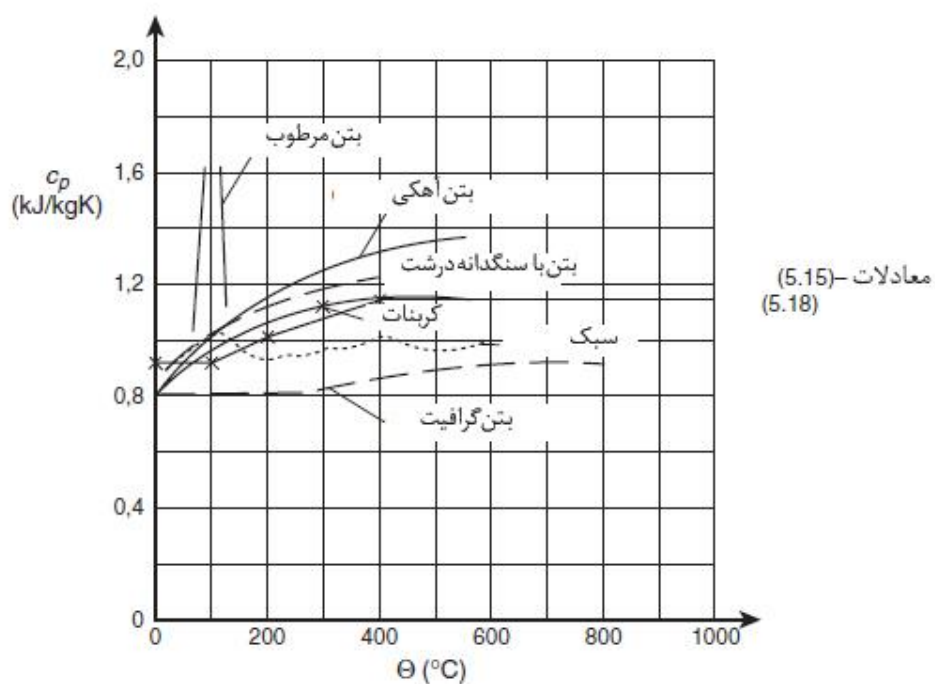
که در آن  $\rho(20^{\circ}C)$  چگالی در شرایط عادی است.

برای محاسبات سازه ای، چگالی بتن را باید برابر مقدار محیطی آن در کل بازه ی دمایی در نظر گرفت.

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | گروه مهندسين<br>دانا |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|
| صفحه: ۴                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                      |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                      |

## ۲-۱- گرمای ویژه

شکل ۱ مقادیر گرمای ویژه ی چندین نوع بتن را ارائه می دهد که در اینجا باید گفت که نوع سنگدانه، تاثیر مهمی در میزان این مقادیر دارد.



شکل ۱: تغییرات گرمای ویژه با دما

EN 1992-1-2 معادلات زیر را برای گرمای ویژه ی بتن خشک با وزن متوسط (با سنگدانه ی آهکی یا

سیلیسی) ارائه می دهد:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 100^{\circ}\text{C} \quad \text{برای}$$

$$c_p(\theta_c) = 900 \quad (۴)$$

$$100^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 200^{\circ}\text{C} \quad \text{برای}$$

$$c_p(\theta_c) = 900 + (\theta_c - 100) \quad (۵)$$

$$200^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 400^{\circ}\text{C} \quad \text{برای}$$

$$c_p(\theta_c) = 1000 + \frac{\theta_c - 200}{2} \quad (۶)$$

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۵                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

$$400^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

برای

$$c_p(\theta_c) = 1100 \quad (7)$$

جدول ۱: مقادیر  $C_{p, peak}$

| محتوای رطوبتی (%) | $C_{p, peak}$ (J/Kgk) |
|-------------------|-----------------------|
| 0                 | 900                   |
| 1.5               | 1470                  |
| 3.0               | 2020                  |
| 10.0              | 5600                  |

که در آن میزان رطوبت در محاسبات گرمایی به طور صریح وارد نمی شود و بنابراین یک مقدار پیک  $C_{p, peak}$  ، به معادله ی ۵ در دمای  $100^{\circ}\text{C}$ – $115^{\circ}\text{C}$  قبل از کاهش خطی تا  $200^{\circ}\text{C}$  اضافه می شود. مقادیر  $C_{p, peak}$  در جدول ۱ ارائه شده اند. معادلات (۴) تا (۷) هم در شکل ۱ به تصویر درآمده اند. برای بتن های سبک، یک مقدار ثابت معادل  $840\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$  را می توان در نظر گرفت (EN1994-1-2).

### ۳-۱- هدایت گرمایی

شکل ۲، مقادیر هدایت گرمایی را برای بتن های مختلف ارائه می دهد. همان طور که مشاهده می شود بتن های با وزن متوسط سنگدانه در داخل محدوده ای قرار می گیرند که حد پایین آن مقادیر هدایت گرمایی بتن سبک است.

EN1992-1-2 معادلات زیر را به عنوان محدوده های مقادیر هدایت گرمایی  $(W/mk)$  بتن های با وزن متوسط و سنگدانه ی سیلیسی، معرفی می کند:

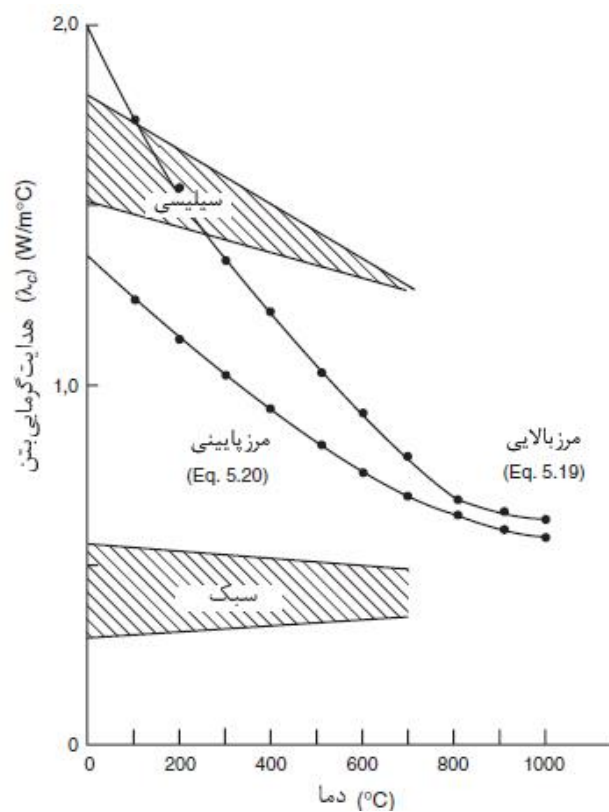
$$\lambda_c = 2.0 - 0.2451\left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0.0107\left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (8)$$

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136\left(\frac{\theta_c}{100}\right) + 0.0057\left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (9)$$

یک پیوست ملی<sup>۱</sup> وجود دارد که مشخص می کند که از کدام منحنی باید استفاده کرد. EN1994-1-2 اشاره می کند که می توان از یک مقدار ثابت  $1.6\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  استفاده کرد.

<sup>۱</sup> (Country's National Annex)

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        | گروه مهندسين<br>دانا |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|----------------------|
| صفحه: ۶                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                      |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                      |



شکل ۲: تغییرات هدایت گرمایی بتن با دما

برای بتن سبک رابطه ی زیر را ارائه می دهد: EN1994-1-2

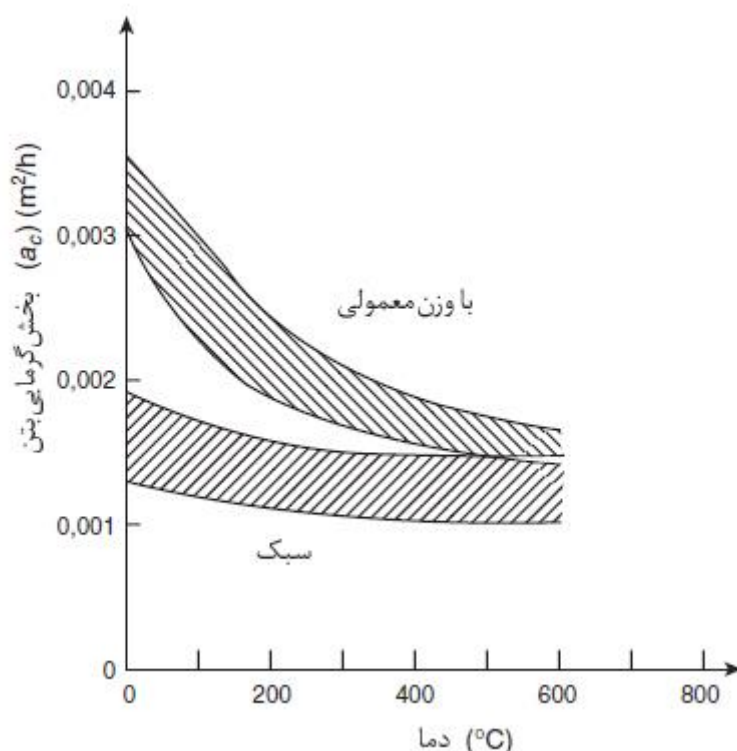
$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 800^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_c = 1.0 - \left( \frac{\theta_c}{1600} \right) \quad (10)$$

$$\theta_c > 800^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_c = 0.5 \quad (11)$$

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        | گروه مهندسين<br>دانا |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|----------------------|
| صفحه: ۷                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                      |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                      |



شکل ۳: تغییرات پخش گرمایی بتن با دما

#### ۱-۴- پخش گرمایی

همان طور که انتظار می رفت، و با توجه به نتایجی که در شکل ۳ به تصویر در آمده اند، مشاهده می شود که دو نوار متمایز از جواب ها وجود دارد که به بتن سبک و بتن با وزن معمولی مربوط می شوند. اگر از مقادیر  $\lambda_c = 1.6 \text{ W/mK}$ ,  $c_c = 1000 \text{ J/kgK}$  که در EN1993-1-2 برای روش های محاسبات ساده پیشنهاد می کند و همچنین چگالی  $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$  استفاده می کنیم، پیشنهاد می شود که مقدار تقریبی پخش گرمایی  $a_c$  را از معادله ی (۱۲) بدست آوریم که اگر این کار را انجام دهیم این مقدار بصورت زیر محاسبه می شود.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_v} \quad (12)$$

چرا که  $a_c = \lambda_c / \rho c_c = 1.6 / (1000 \times 2400) = 0.67 \text{ m}^2/\text{s}$  البته این مقدار، عدد بزرگی است. Hertz (1988) پیشنهاد داد که مقدار  $a_c$  برای گرانیت (یا سنگ بستر دریا) برابر با  $0.35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و برای بتن های کوارتزیت برابر با  $0.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  در نظر گرفته می شود و همچنین Wickstrom (1985a) مقدار  $a_c = 0.417 \text{ m}^2/\text{s}$  را پیشنهاد می کند.

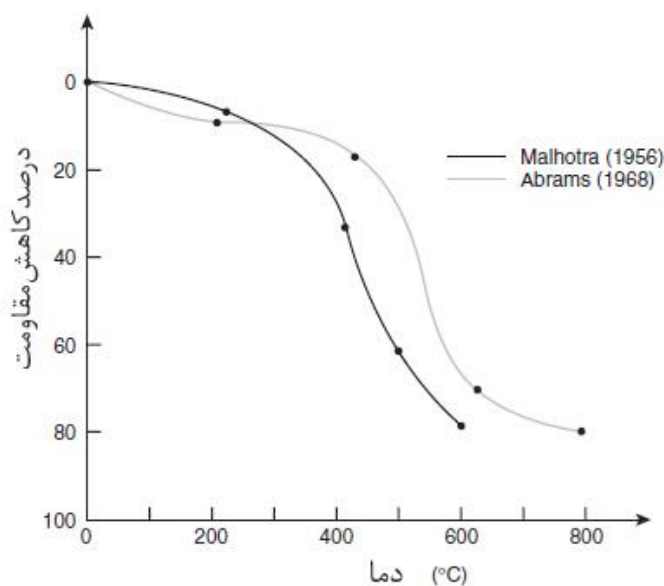
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | <br>گروه مهندسی |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| صفحه: ۸                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                 |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                 |

## ۲- مشخصه های مقاومتی بتن

به دلیل طیف گسترده ای که انواع بتن بر حسب طرح اختلاط، نوع سنگدانه، سن بتن و... دارند، در چنین مجالی، نمی توان داده های کاملی از رفتار بتن ارائه داد؛ بر همین اساس تنها نتایج نوعی ارائه خواهد شد.

### ۲-۱- داده های تنش - کرنش

در تحقیقات اولیه بیشتر تمایل بر این بود که مقادیر مشخصه مثل مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته اندازه گیری شوند تا اینکه رفتار کامل تنش - کرنش تعیین شود. گرچه بیشتر کارهایی که صورت گرفت روی نمونه هایی بود که بدون هیچ گونه بارگذاری گرم می شدند، به زودی به این نتیجه رسیدند که اگر گرمایش تحت یک تنش وارده صورت گیرد (یا پیش بارگذاری انجام شود) کاهش مقاومت کمتری مشاهده می شود. داده های مربوط به تحقیقات *Malhotra* و *Abrams* در شکل ۴ به تصویر در آمده است.



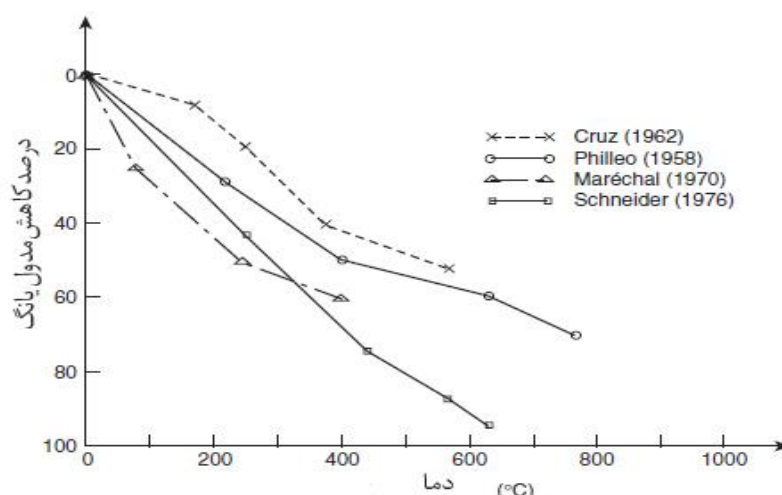
شکل ۴: تغییرات مقاومت بتن با دما

همچنین این نتیجه حاصل شد که وقتی محققان مختلف از روش های آزمایش متفاوت استفاده می کردند، مثلاً برای اندازه گیری مدول الاستیسیته از نمونه ی استوانه ای در فشار استفاده می شد، مدول های دینامیکی اندازه گیری می شد، یا استوانه ها در پیچش قرار می گرفتند، مقادیر مطلق نتایج متفاوت بودند، اما شکل کلی نتایج مشابه بودند (شکل ۵).



| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | گروه مهندسين<br>SME |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------|
| صفحه: ۹                         |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                     |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                     |

اولین محققی که منحنی تنش - کرنش بتن را کامل کرد، *Furamura (1966)* بود. نتایج تحقیقات وی نشان می دهد که علاوه بر اینکه تنش فشاری و مدول الاستیسیته کاهش پیدا می کنند، شیب شاخه ی نزولی منحنی هم کاهش می یابد. (شکل ۵).



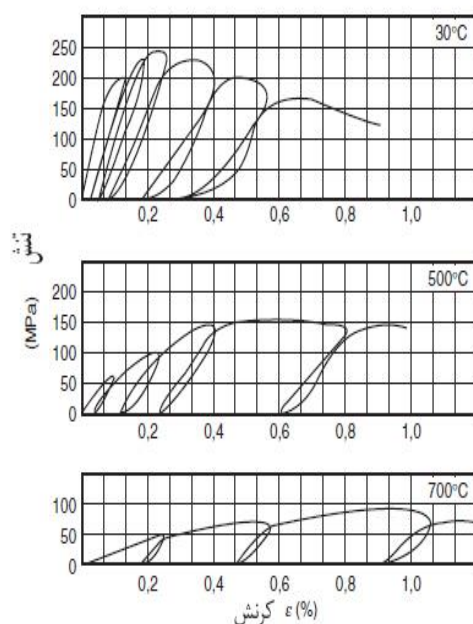
شکل ۵: تغییرات مدول یانگ بتن با دما

*North, Baldwin (1973)* اشاره کردند که اگر نتایج *Furamura* با توجه به نقطه ی پیک تنش فشاری (یا نقطه ی  $\max$ )، و میزان کرنش در آن نقطه (که معمولاً به آن کرنش پیک می گویند) بعدبندی نشوند، منحنی ها به یک تک منحنی کاهش پیدا می کنند که آن منحنی را می توان با معادله ی زیر تعریف کرد:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{0,c}} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0,c}} \exp\left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0,c}}\right) \quad (13)$$

که در آن  $\sigma_c$ ،  $\varepsilon_c$  به ترتیب تنش و کرنش و  $\sigma_{0,c}$  مقدار ماکزیمم یا پیک تنش و  $\varepsilon_{0,c}$  میزان کرنش مربوط به نقطه ی پیک تنش می باشد. لازم به ذکر است که گرچه معادله ی (۱۳) خاص داده های *Furamura* می باشد، اما اصل نرمالیزه کردن در هر سری از منحنی های تنش - کرنش برای نوعی از بتن مورد نظر، حفظ خواهد شد. همچنین اقتباسی از معادله ی (۱۳) در *Furmura* و دیگران ارائه شده است.

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۰                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |



شکل ۶: منحنی های تنش - کرنش بتن بدون پیش بارگذاری در دماهای بالا

معادله ی کلی تری که برای منحنی تنش - کرنش بتن وجود دارد، مربوط به (Popovics (1973 می باشد:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{0,c}} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0,c}} \frac{n}{n-1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0,c}} \right)^n} \quad (14)$$

جهت هماهنگ کردن معادله ی (37.5) با هر گونه داده های حاصل از آزمایش، تنها به یک پارامتر  $n$  نیاز

است که در معادله ی (۱۳) تعریف شده است.

$$\frac{1}{n} = 1 - \frac{\sigma_{0,c}}{\varepsilon_{0,c} E_c} \quad (15)$$

Popovics اظهار داشت که  $n$  تنها به مقاومت بتن وابسته است، در حالی که با توجه به تحلیل هایی در مورد

منحنی های تجربی تنش - کرنش حاصل از آزمایشات در دماهای بالا انجام شده است، احتمالاً  $n$  به اندازه ی

سنگدانه و نسبت سیمان - سنگدانه (یا حجم شکست سنگدانه) نیز وابسته است، چرا که این مساله روی غیرخطی

بودن منحنی تنش - کرنش (جدول ۲) هم اثر می گذارد. پارامتر  $n$  را می توان به عنوان میزان درجه ی غیرخطی

بودن منحنی تنش - کرنش که تحت تاثیر نسبت سیمان - سنگدانه و اندازه ی سنگدانه است، تفسیر کرد.

هنگامی که نمونه در طول سیکل گرمایش پیش بارگذاری می شود و مشخصات تنش - کرنش مشخص می

شوند، همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، مشاهده می شود که مشخصات به میزان بسیار کمتری

تحت تاثیر دما قرار دارند. این مساله به احتمال قریب به یقین به دلیل اثر پیش بارگذاری (یا پیش تنیدگی) می

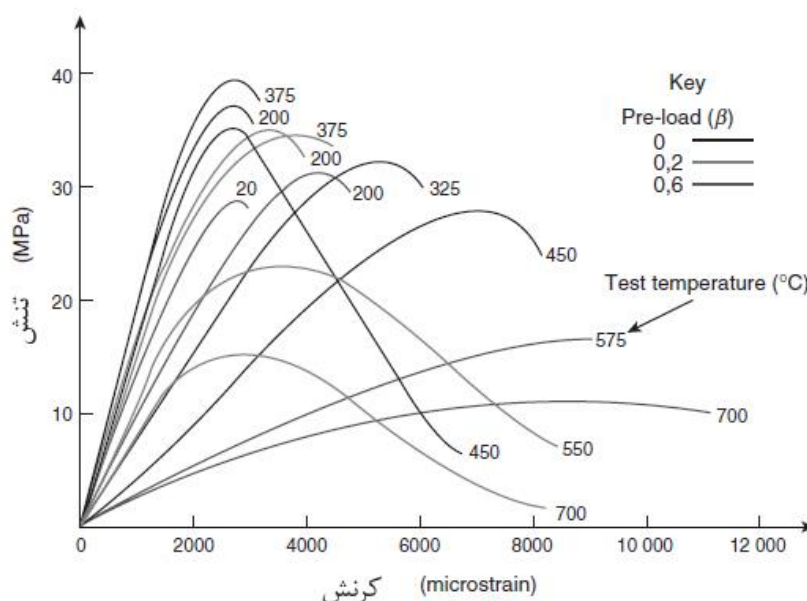
|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۱                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

باشد که اگر وجود نداشت در اثر هر گونه ناسازگاری گرمایی ترک هایی به وجود می آمد و این ترک ها باعث گسستگی بین سنگدانه و دیگر مصالح می شد، در حالی که پیش بارگذاری این مساله را از بین برده و یا حداقل کاهش می دهد. (Guise (1997 این ادعا را حداقل در اندازه گیری چگالی ترک های باقی مانده، به اثبات می رساند.

## جدول ۲: تغییرات پارامتر $n$ منحنی تنش - کرنش با طرح اختلاط بتن

| مرجع                               | جزئیات اختلاط                             | نسبت  | پیش بارگذاری      | n                    |
|------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------------------|----------------------|
| Furmura,1966                       | کوارتزیت<br>$a/s/c(+):2.9/2.8/1$          | 0.70  | 0                 | 1.58                 |
| Anderberg and Thelandersson (1972) | کوارتزیت (20mm)<br>$a/s/c(+):1.92/2.88/1$ | 0.60  | 0                 | 2.00                 |
| Purkiss (1972)                     | کوارتزیت (10mm)<br>$a/s/c(+):1.2/1/1$     | 0.454 | 0                 | 6.90                 |
| Schneider(1976)                    | کوارتزیت OPC<br>$240Kg/m^3$               | 0.8   | 0<br>0.10<br>0.30 | 3.57<br>2.44<br>2.22 |
| Bali (1984)                        | کوارتزیت (10mm)<br>$a/s/c(+):3.5/2.5/1$   | 0.65  | 0<br>0.20<br>0.60 | 7.25<br>2.31<br>2.68 |

(\*) پیش بارگذاری، در حالی که بار در طول گرمایش اعمال می شود، برای مقاومت بتن مشخص شده است.  
(+)  $a/s/c$  نسبت سیمان / ماسه / سنگدانه می باشد.



شکل ۷: منحنی تنش - کرنش بتن با پیش بارگذاری در دماهای بالا

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۲                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

## ۲-۲- خزش

خزش بتن در دماهای بالا بسیار بیشتر از خزش آن در دمای معمولی است. از آنجائی که خزش به عنوان پدیده ای از نوع Arrhenius در نظر گرفته می شود، نسبت خزش برابر با  $\exp(-U/\theta)$  خواهد بود که در آن  $U$  انرژی فعال و  $\theta$  دمای مطلق است. تغییرات کرنش خزشی با زمان را در طول زمان در نظر گرفته شده که در بیشتر آزمایش های خزش در دماهای بالا برابر ۵ ساعت یا کمتر می باشد، می توان به صورت یک قانون بیان کرد. طبیعتاً تنها خزش های اولیه و ثانویه قابل رویت هستند، البته در دماهای بسیار بالا با افزایش تنش نسبت خزش هم قابل مشاهده خواهد بود که به موجب آن می توان احتمال این را داد که اولین گسست خزشی ممکن است اتفاق بیافتد. داده های نوعی مربوط به خزش بتن در شکل ۷ ارائه شده اند.

## ۲-۳- انبساط گرمایی آزاد

انبساط گرمایی آزاد کاملاً تحت اثر نوع سنگدانه است. انبساط گرمایی آزاد بر حسب دما، خطی نمی باشد که این مساله در شکل ۸ به نمایش در آمده است. این رفتار غیرخطی تا حدی به دلیل تغییرات شیمیایی (به عنوان مثال تجزیه ی سنگ آهک در دمای حدود  $650^{\circ}\text{C}$ ) و تا حدی هم به دلیل تغییرات فیزیکی آن می باشد (مثل تغییر فاز کوارتز  $\alpha$ - $\beta$  به سنگدانه های سیلیسی در دمای حدود  $750^{\circ}\text{C}$ ). بخش دیگر این رفتار غیرخطی به گسست بین سنگدانه و دیگر مصالح مربوط می شود. وجود آب آزاد حتی در دمای زیر  $150^{\circ}\text{C}$  نیز روی نتایج اثر می گذارد چرا که خروج آب باعث انقباض ویژه<sup>۱</sup> می شود. EN1992-1-2 معادلات زیر را برای کرنش آزاد بتن با وزن معمولی ارائه می دهد:

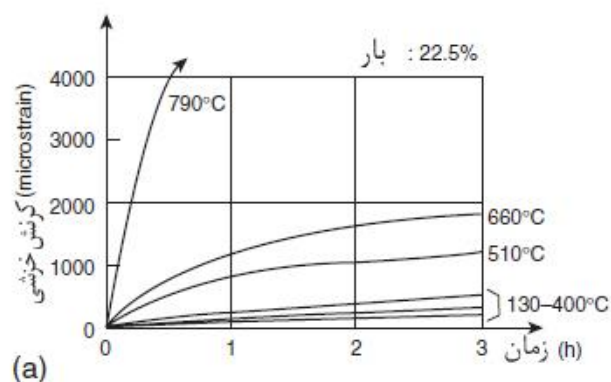
سنگدانه سیلیسی:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 700^{\circ}\text{C}$$

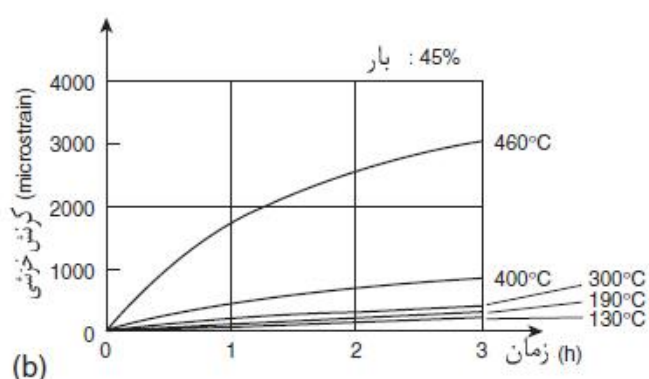
$$\varepsilon_{th,c} = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2.3 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad (14)$$

<sup>۱</sup> (net shrinkage)

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۱۳                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

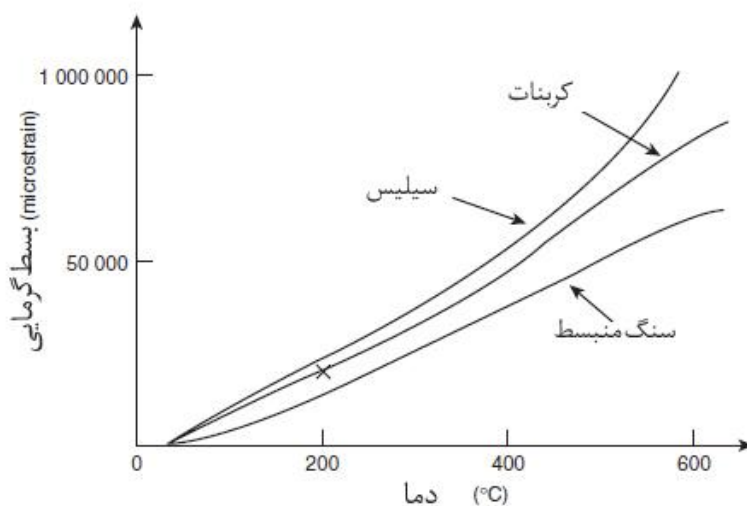


(a)



(b)

شکل ۸: داده های مربوط به خزش ایزوترمال برای بتن در دماهای بالا



شکل ۹: انبساط گرمایی بتن

$$700^{\circ}C \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}C$$

$$\varepsilon_{th,c} = 14 \times 10^{-3} \quad (15)$$

بتن با سنگدانه ی آهکی:

$$20^{\circ}C \leq \theta_c \leq 805^{\circ}C$$

$$\varepsilon_{th,c} = -1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta_c + 1.4 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad (16)$$

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۴                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

$$805^{\circ}C \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}C$$

$$\varepsilon_{th,c} = 12 \times 10^{-3} \quad (17)$$

در محاسبات تقریبی ضریب کرنش های گرمایی را می توان برابر مقادیر زیر در نظر گرفت:

برای سنگدانه سیلیسی:

$$\varepsilon_{th,c}(\theta_c) = 18 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (18)$$

برای سنگدانه آهکی:

$$\varepsilon_{th,c}(\theta_c) = 12 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (19)$$

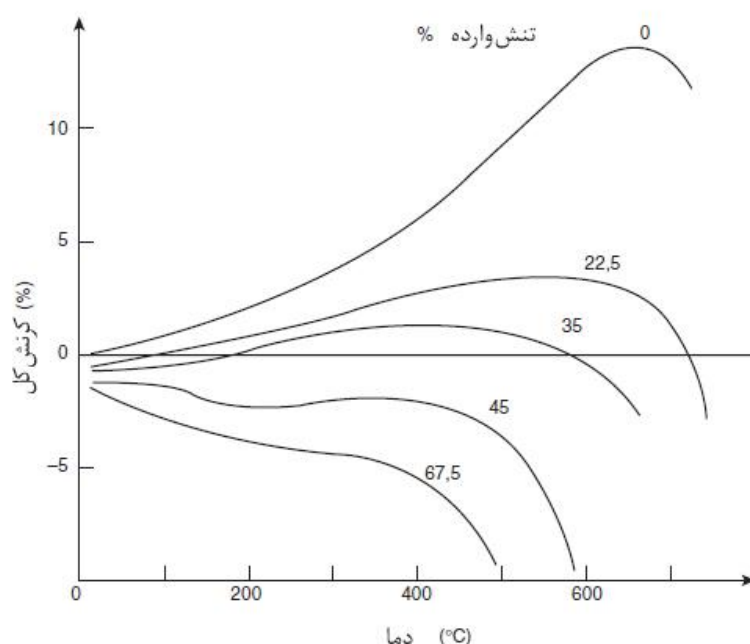
EN1994-1-2 رابطه ی زیر را برای بتن سبک ارائه می دهد:

$$\varepsilon_{th,c}(\theta_c) = 8 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (20)$$

## ۲-۴- آزمایش های ناپایدار

اگر نمونه ای از بتن با نرخ ثابتی و تحت تنش های ثابتی گرم شود و کرنش ها اندازه گیری شوند، مشاهده می شود که این کرنش ها تابعی از تنش وارده می باشند که این مساله در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود کرنش های اولیه ای که ثبت شده اند، کرنش های کششی هستند. در ادامه با افزایش دما این کرنش ها به صورت فشاری ثبت می شوند و در نهایت نرخ کرنش بسیار بالا می رود و به حد شکست نزدیک می شود. در تنش های خیلی بالا، کرنش در تمام محدوده های دمایی به صورت فشاری خواهد بود. بزرگی کرنش های اندازه گیری شده تابعی از نرخ گرمایش، اختلاط بتن (شامل نوع سنگدانه، که البته بیشتر آزمایش ها روی سنگدانه ی سیلیسی انجام می شود) و میزان تنش می باشد.

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۵                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |



شکل ۱۰: تغییرات کرنش کل با دما برای بتنی که تحت بارگذاری گرم شده است

اگر این کرنش های کل بر اساس کرنش های انبساط گرمایی آزاد، کرنش های الاستیک آنی و کرنش هایی که از آزمایشات قدیمی خزش بدست می آیند محاسبه گردند، ملاحظه می شود که ترم دیگری که به عنوان کرنش گذرا شناخته می شود،<sup>۱</sup> باید در محاسبات وارد شود تا شرط لازم تعادل کرنش برقرار گردد. چنین کرنش گذرایی اساساً به دلیل تنش های مشخص شده و ناسازگاری گرمایی که بین سنگدانه و ملات سیمان وجود دارد، می باشد. لازم به ذکر است که این کرنش های گذرا تنها در سیکل اول گرمایش بروز می کنند ولی در اولین سیکل سرمایش وجود ندارند. سیکل های گرمایش و سرمایش بعد از آن دیگر وجود چنین کرنشی را نشان نمی دهند. بعلاوه ذکر این نکته لازم است که این کرنش های گذرا را تنها با اندازه گیری کرنش کل، کرنش گرمایی آزاد و کرنش های الاستیک می توان بدست آورد. *Anderberg and Thelandersson, 1976* اولین کسانی بودند که این کرنش های گذرا را مشخص کردند. حجم قابل توجهی از داده ها در مورد کرنش های گذرا طی تحقیقات بعدی که در کالج *Imperial* (لندن) صورت گرفت، گزارش شده است که در آنجا در مورد اثر توام تنش های وارده و نوع سنگدانه با نرخ گرمایش تحقیقاتی صورت گرفته بود. گرچه *Khoury* و دیگران منحنی اصلی کرنش گذرا را بدست آوردند، اما در آن زمان تلاشی برای حدس

<sup>۱</sup> (transient strain)

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |        |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
| صفحه: ۱۶                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |

زدن میزان کرنش گذرا بعد از محاسبه ی کرنش الاستیک در اولین مرحله ی بارگذاری انجام نداند. مبحث حدس زدن کرنش های گذرا در بخش ۲,۳,۵ پوشش داده خواهد شد.

## ۲-۵- مقاومت کششی بتن در دمای بالا

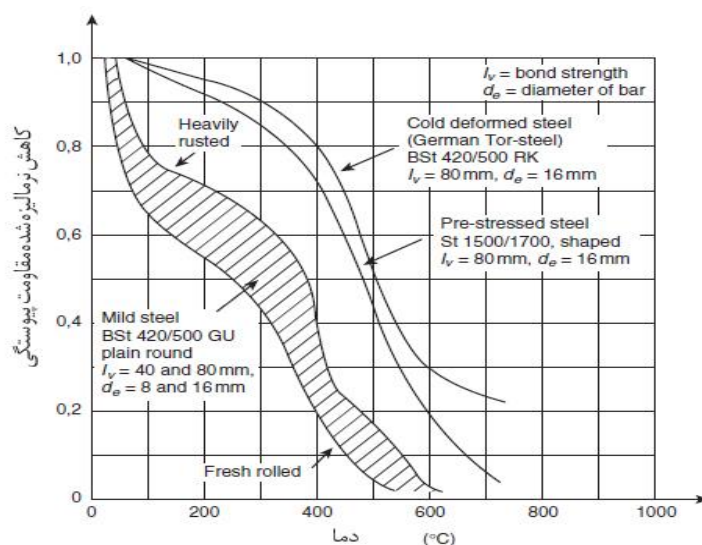
داده های محدودی در مورد مقاومت کششی که از آزمایش کشش مستقیم یا مقاومت شکافتگی بتن بدست می آید، در دست است. (Gambarova, Felicetti (2003 اظهار می کنند که در آزمایش های کشش مستقیم، مقاومت کششی در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  تا حدود 0.25 برابر مقدار محیطی آن کاهش می یابد. آنها بعلاوه بیان می دارند که نسبت مقاومت کششی شکافتگی بتن به مقاومت کششی مستقیم برای انواع بتن در دمای  $20-750^{\circ}\text{C}$ ، حدود 1.2-1.6 می باشد؛ گرچه الگوی ثابتی برای رسیدن به مقادیر دقیق وجود ندارد.

## ۲-۶- مقاومت پیوستگی

همانگونه که انتظار می رود، مقاومت پیوستگی بین بتن و فولاد، چه فولاد تقویتی باشد، چه فولاد پیش-تندگی، با کاهش دما افزایش می یابد. میزان این کاهش، تابعی از آرماتور (آج دار یا صاف) و نوع بتن می باشد. بعلاوه نتایج دقیقی که بدست می آیند می توانند متاثر از روش آزمایش مورد استفاده باشند، چرا که هیچ گونه روند آزمایش استاندارد شده ای برای این منظور وجود ندارد. تعدادی از نتایج نوعی در شکل ۱۱ ارائه شده اند. مقاومت پیوستگی در بتن های مسلح به ندرت حالت بحرانی دارد، چرا که آرماتورهایی که در پایین یک تیر یا دال بتنی قرار دارند میزان اندکی از بار وارده را تحمل می کنند و آرماتورهای موجود در تکیه گاه ها نیز خیلی کم تحت اثر دما خواهند بود، بنابراین می توانند تمام تنش پیوستگی را تحمل کنند. پیوستگی بیشتر در بتن های پیش تنیده مطرح است و می تواند حالت بحرانی داشته باشد، گرچه شکست های بسیار کمی (حتی شاید هیچ شکستی) بر اثر کاهش پیوستگی بتن اتفاق افتاده است.



| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | گروه مهندسين<br>دانشگاه تهران |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------------------|
| صفحه: ۱۷                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                               |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                               |



شکل ۱۱: تغییرات مقاومت پیوستگی بین آرماتور و بتن در دماهای بالا

## ۲-۲- بتن های پر مقاومت ( $HSC$ ) و خود متراکم ( $SCC$ )

بتن پر مقاومت ( $HSC$ )، بتنی است که مقاومت سیلندری آن از  $60\text{Mpa}$  بیشتر است و بتن خود متراکم ( $SCC$ ) را می توان با همان بتن پر مقاومت یکی در نظر گرفت، چرا که  $SCC$ هایی که در حال حاضر تولید می شوند مقاومت هایی مشابه  $HSC$ ها دارند.

### ۲-۲-۱- بتن با عملکرد بالا<sup>۱</sup>

$Carino, Phan(1998)$  توضیح مختصر بسیار خوبی از تغییرات ویژگی های مقاومتی با دما ارائه می دهند. خلاصه توضیحات آنها درباره ی کاهش مقاومت در بتن های سبک و بتن هایی با وزن معمولی در شکل های ۱۲ (a) و ۱۲ (b) ارائه شده است و کاهش مدول الاستیسیته نیز در شکل ۱۲ (c) نشان داده شده است. باید به این نکته اشاره شود که عملکرد  $HSC$ ها متغیر است، بگونه ای که بعضی از آنها مشابه بتن های با مقاومت معمولی ( $NSC$ )ها عمل می کنند در حالی که عده ای دیگر بسیار بدتر عمل می کنند تا حدی که تقریباً کاهشی ۴۰ درصدی از مقاومت در دمای  $200-300^{\circ}\text{C}$ ، قبل از میزان کم افزایش مجدد مقاومت که در  $400-450^{\circ}\text{C}$  به وقوع می پیوندد، در آنها به وجود می آید. بعد از این مرحله تفاوت کوچکی بین  $HSC$  و بتن معمولی وجود خواهد داشت. کاهش مدول الاستیسیته همانند بتن معمولی است.  $Purkiss(2000)$  این مساله را مطرح کرد که

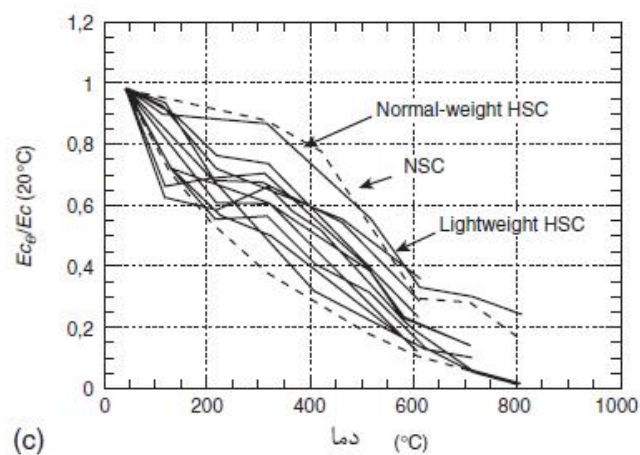
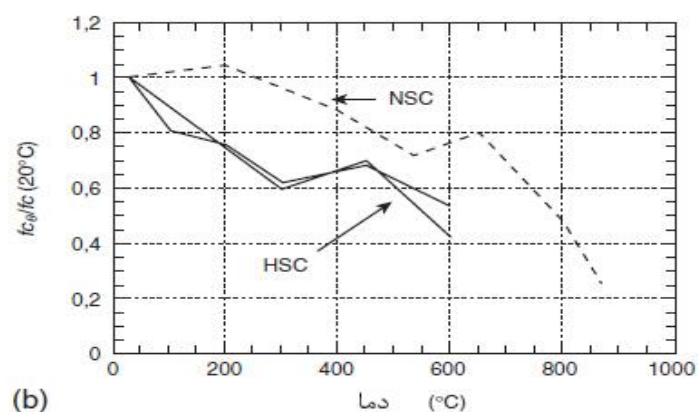
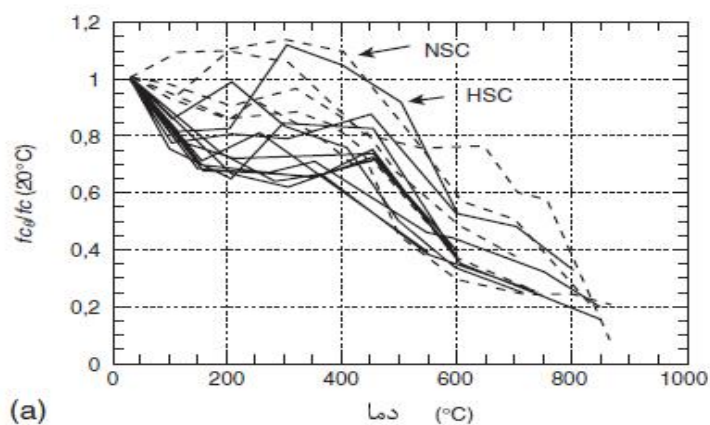
<sup>۱</sup> (High-Performance concrete)

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۱۸                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

اثر سن بتن احتمالاً فاکتوری از رفتار HSC ها در دماهای بالا می باشد و این موضوع هم احتمالاً به دلیل میزان رطوبت آن خواهد بود.

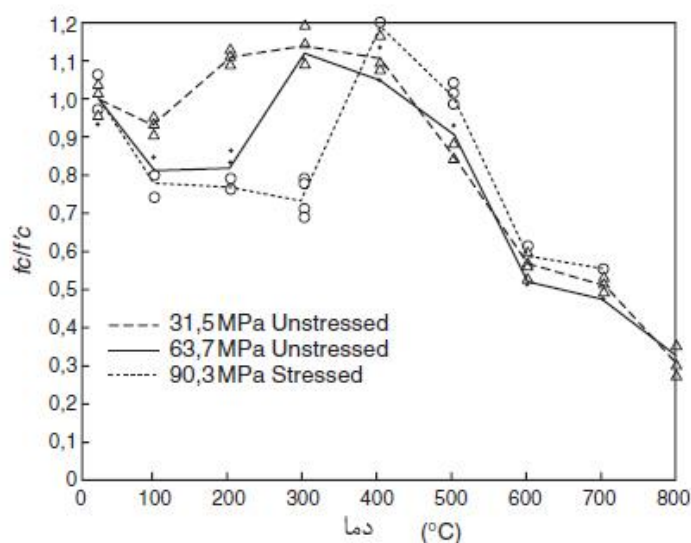
Durani,Castillo(1990) بیان می کنند که پیش بار گذاری نمونه قبل از گرمایش تا دماهای کمتر از  $400^{\circ}\text{C}$ ، کاهش مقاومت را تشدید می کند در حالی که در دمای حدود  $500^{\circ}\text{C}$  این عمل باعث افزایش مقاومتی در حدود 20% خواهد شد (شکل ۱۳). آنها نیز به تفاوت اندک رفتار مدول الاستیک بین HSC, NSC اشاره می کنند. Gillen (1997) اشاره می کند که تفاوت کوچکی بین رفتار بتن با سنگدانه ی معمولی HSC و بتن با سنگدانه ی سبک HSC وجود دارد. Fu و دیگران (2005) داده هایی را برای منحنی کامل تنش - کرنش انواع HSC ها در هر دو حالت تنیدگی و تنیده نشده ارائه می دهند. نتایج آنها تا حدی غیرعادی به نظر می رسد بگونه ای که بتن هایی که تحت تنش گرم شده اند از نظر مقاومتی شبیه یا بدتر از نمونه های مشابه که بدون تنیدگی گرم شده اند عمل می کنند. اثری که روی مدول الاستیسیته در هنگام گرمایش تحت بار گذاشته می شود، به صورت نامنظم ظاهر می شود، اما اگر آن را برای نمونه های تحت تنش نرمالیزه کنیم، با سرعت کمتری کاهش می یابد. Schneider (1986b, 1988) نشان می دهد که برای NSC، وقتی بتن تحت بارگذاری گرم می شود، مدول الاستیسیته افزایش می یابد. Colina,Hassen(2006) داده هایی از کرنش گذرا را برای بتن های با عملکرد بالا ارائه می دهند.

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |        |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۱۹                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV | پروژه: |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |        |                                                                                    |



شکل ۱۲: روابط دما-مقاومت برای: (a) بتن های NWA؛ (b) بتن های LWA که با آزمایش های بدون تنش بدست آمده و (c) روابط دما-مدول الاستیسیته برای بتن های LWA, NWA بدست آمده از نتایج آزمایشات بدون تنش

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | <br>گروه مهندسين<br>دانشگاه تهران |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۲۰                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                                                     |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                                                     |



شکل ۱۳: تغییرات مقاومت فشاری با افزایش دما

## ۲-۷-۲- بتن خود متراکم

(Persson (2003) داده های کثیری در مورد بتن های SCC با مقاومت های بین 15, 60Mpa ارائه می دهد

که این داده ها در فرمول زیر خلاصه می شوند:

مقاومت فشاری:

$$\frac{\sigma_{c,\theta}}{\sigma_{c,20}} = -0.0000012\theta_c^2 - 0.000131\theta_c + 0.99 \quad (21)$$

مدول الاستیسیته:

$$\frac{E_{c,\theta}}{E_{c,20}} = -0.0000013\theta_c^2 - 0.00221\theta_c + 1.04 \quad (22)$$

کرنش در تنش پیک:

$$\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c,20}} = -0.0000022\theta_c^2 - 0.00279\theta_c + 0.95 \quad (23)$$

آزمایش های صورت گرفته روی مدول های استاتیک و دینامیک (Persson, 2003) روابط زیر را که بین

مقاومت بتن و دما و مدول مربوطه است، ارائه می دهد:

مدول دینامیک  $E_{dyn,\theta}$  (Gpa):

$$E_{dyn,\theta} = (0.837 - 0.00079\theta_c)\sigma_{c,20} \quad (24)$$

مدول استاتیک  $E_{stat,\theta}$  (Gpa):

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۲۱                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

$$E_{stat,\theta} = (0.00211 + 37.4 \times 10^{-6} \theta_c - 91.6 \times 10^{-9} \theta_c^2) \sigma_{c,20}^2 \quad (25)$$

تحت  $5MPa \leq \sigma_{c,20} \leq 60MPa$ .

Persson بعلاوه نشان می دهد که هنگامی که از الیاف پلی پراپیلن استفاده می شود، برای میزان مصرف 0-  $4Kg/m^3$  از این الیاف مقاومت 2.3% در هر  $Kg/m^3$  افت می کند. Clayton , Lennon (1999) این مساله را برای بتن با عملکرد بالا و برای میزان استفاده ی  $3Kg/m^3$  که منجر به کاهش 5 درصدی مقاومت می شود، تأیید می کنند.

## ۸-۲- بتن الیافی

### ۸-۲-۱- بتن با الیاف فولاد

Kodur , Lie (1995,1996) سری معادلات زیر را برای هدایت گرمایی ( $W/mk$ ) بتن با سنگدانه ی سیلیسی

و آرماتور از جنس الیاف فولاد، ارائه می دهند:

$$0^\circ C \leq \theta_c \leq 200^\circ C$$

$$\lambda_c = 3.22 - 0.007\theta_c \quad (26)$$

$$200^\circ C \leq \theta_c \leq 400^\circ C$$

$$\lambda_c = 2.24 - 0.0021\theta_c \quad (27)$$

$$400^\circ C \leq \theta_c \leq 1000^\circ C$$

$$\lambda_c = 1.40 \quad (28)$$

برای بتن کربناتی با آرماتور، مقادیر هدایت گرمایی بصورت زیر می باشد:

$$0^\circ C \leq \theta_c \leq 500^\circ C$$

$$\lambda_c = 2.00 - 0.001775\theta_c \quad (29)$$

$$500^\circ C \leq \theta_c \leq 1000^\circ C$$

$$\lambda_c = 1.402 - 0.00579\theta_c \quad (30)$$

مقادیر مربوط به بتن های با الیاف فولاد تنها به میزان کمی از بتن های بدون الیاف بیشتر است.

داده هایی که Kodur , Lie برای گرمای ویژه ارائه می کنند، نشان می دهند که وقتی از سنگدانه ی سیلیسی استفاده می شود، به غیر از پیک های کوچکی که در حدود  $420^\circ C, 100$  اتفاق می افتند، گرمای ویژه در محدوده ی دمای بین  $0$  تا  $1000^\circ C$  می تواند مقداری تا حد  $1000J/KgC$  هم اتخاذ کند. این مساله می تواند

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۲۲                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

در مورد بتن با سنگدانه ی کربناتی هم به این گونه صادق باشد که بعد از اینکه یک پیک بزرگ در حد  $8000\text{J/KgC}$  در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  اتفاق می افتد، در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  این مقدار تکرار می شود.

*Kodur , Lie* داده های زیر را در مورد ضریب انبساط گرمایی،  $\alpha_c$  ارائه می دهند:

سنگدانه سیلیسی:

$$0^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 530^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.00115 + 0.000016\theta_c \quad (31)$$

$$530^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 600^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.0364 + 0.000083\theta_c \quad (32)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = 0.0135 \quad (33)$$

سنگدانه آهکی:

$$0^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 750^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.00115 + 0.00001\theta_c \quad (34)$$

$$750^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1000^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_c = -0.05187 + 0.000077\theta_c \quad (35)$$

*Purkiss(1987)* اشاره می کند که تا دمای  $500^{\circ}\text{C}$  الیاف باعث کاهش حدود 20 درصدی انبساط گرمایی می شوند ولی بعد از آن، قضیه کمی متفاوت خواهد بود و این اثر به وضوح وابسته به حجم گسست الیاف است.

*Kodur , Lie*، بعلاوه، فرمول زیر را برای منحنی تنش - کرنش ارائه می دهند. بدون در نظر گرفتن سنگدانه، منحنی تنش - کرنش به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{0,\theta}$$

$$\frac{\sigma_{c,\theta}}{\sigma_{c,0}} = 1 - \left( \frac{\varepsilon_{0,\theta} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,\theta}} \right)^2 \quad (36)$$

$$\varepsilon_c > \varepsilon_{0,\theta}$$

$$\frac{\sigma_{c,\theta}}{\sigma_{c,0}} = 1 - \left( \frac{\varepsilon_{0,\theta} - \varepsilon_c}{3\varepsilon_{0,\theta}} \right)^2 \quad (37)$$

که در آن کرنش متناظر با تنش ماکزیمم  $\varepsilon_{0,\theta}$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varepsilon_{0,\theta} = 0.003 + (7.0\theta_c + 0.05\theta_c^2) \times 10^{-6} \quad (38)$$

ضریب های کاهش مقاومت  $\sigma_{c,0}/\sigma_{c,0,20}$  به صورت زیر تعریف می شوند:

|                                 |  |     |     |     |     |     |     |     |                                                                                    |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------|
| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     |  |
| صفحه: ۲۳                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                    |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                    |

$$0^{\circ}C \leq \theta_c \leq 150^{\circ}C$$

$$\frac{\sigma_{c,0,\theta}}{\sigma_{c,0}} = 11 + 0.000769(\theta_c - 20) \quad (39)$$

$$150^{\circ}C \leq \theta_c \leq 400^{\circ}C$$

$$\frac{\sigma_{c,0,\theta}}{\sigma_{c,0}} = 1.1 \quad (40)$$

$$\theta_c > 400^{\circ}C$$

$$\frac{\sigma_{c,0,\theta}}{\sigma_{c,0}} = 2.011 - 2.353 \frac{\theta_c - 20}{1000} \quad (41)$$

EL-Ausi, Fairyradh (1989) داده هایی از مقاومت شکافنگی بتن در دماهای بالا برای بتن با الیاف فولاد و شیشه ارائه می دهند. آنها نشان می دهند که مقاومت کششی شکافنگی بتنی که الیاف ندارد تا دمای  $700^{\circ}C$  به صفر خواهد رسید. اگر نتایج بر حسب الیاف 1% نرمالیزه شوند، مشاهده می شود که نسبت به حالت الیاف 0.5%، 0.7% که مشابه هم هستند، کاهش کمتری وجود دارد. تمام بتن هایی که الیاف فولادی دارند تا دمای  $800^{\circ}C$ ، 25% از مقاومت خود را حفظ خواهند کرد. اما نتایج حاصل برای بتن با الیاف شیشه ای غیرعادی است، بگونه ای که وقتی 0.5% الیاف وجود دارد کاهش کمتری در مقاومت نسبت به حالتی که 1.0% یا 0.7% الیاف وجود دارد، اتفاق می افتد و مقاومتی که تا دمای  $800^{\circ}C$  باقی می ماند حدود 14% است.

## ۲-۸-۲- بتن های باز تولیدی و بتن فیبردار با دوغاب نفوذی (SIFCON)<sup>۱</sup>

Austen, Robbins (1992) آزمایش هایی را روی بتن های باز تولید شده ی مسلح در دماهای بالا انجام دادند و کاهش حدود 60 درصدی مقاومت را در دمای  $850^{\circ}C$  گزارش دادند. اثر نوع الیاف در بتن هایی که میزان الیاف آنها بیشتر است پررنگ تر می باشد، گرچه وقتی نتایج را نرمالیزه کنیم میزان الیاف اهمیت چندانی نخواهد داشت.

SIFCON نوعی بتن دوغابی است که میزان الیاف آن ماکزیمم حدود 10% است. Maleki-Toyserkani, Purkiss, Short (2001) نشان می دهند که تغییرات پخش گرمایی با دما بین دماهای  $20^{\circ}C$  تا  $100^{\circ}C$  به صورت خطی بوده و از مقدار  $2mm^2/s$  در دمای  $20^{\circ}C$  به مقدار  $0.5mm^2/s$  برای SIFCON و به  $0.7mm^2/s$

<sup>۱</sup> (Refractory concretes and slurry infiltrated fibre concrete)

| مشخصات مصالح در دمای بالا - بتن |  |     |     |     |     |     |     |     | <br>گروه مهندسين<br>دانشگاه تهران |
|---------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| صفحه: ۲۴                        |  | DEP | PRJ | CAT | DIS | TYP | SEQ | REV |                                                                                                                     |
| شهریور ۹۴                       |  |     |     |     |     |     |     | ۰۱  |                                                                                                                     |

برای ملات می رسد و بعد از آن ثابت می ماند. چنین رفتاری مشابه رفتار بتن های الیاف دار معمولی با میزان الیاف حداکثر 3% می باشد (Purkiss, 1987). پخش گرمایی SIFCON بعد از محدوده ی دمایی  $20-800^{\circ}\text{C}$  کاملاً ثابت بوده و مقدار  $22-23\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$  را خواهد داشت. در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  ملات به اندازه ی  $2000\mu\text{strain}$  منانبساط می شود و بعد از آن ثابت می ماند.

## ۹-۲- رفتار چند محوری

(Thelandersson 1982) تلاش هایی را جهت فرموله کردن یک مدل ساختاری چند محوری برای بتن در دماهای بالا صورت دارد؛ که برای اینکار از کرنش حجمی به عنوان یک پارامتر خرابی عددی استفاده کرد. او توانست رابطه ای منطقی بین این مدل و نتایج آزمایش تک محوری برقرار کند. او بعلاوه، به این موضوع اشاره کرد که به منظور اثبات و اعتبار بخشیدن به مدل نیاز به داده های بیشتری می باشد. با توجه به آگاهی نویسنده نسبت به این موضوع، این بحث پیشرفت چندانی نداشته است. چرا که باید اشاره شود که چنین آزمایش هایی پیچیده و در نتیجه هزینه بر می باشند. بنابراین شاید بتوان در بیشتر مدل کردن ها (به غیر از آنها که بالقوه سه محوری اند) برای آزمایش خردشدگی، از داده های تک محوری استفاده کرد.