

# آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی

محل ضرب مهرهای تحت کنترل- منسوخ							۰۳
							۰۲
							۰۱
				امیر ساعدی	وحید پاچیده	آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی	۰۰
	تاریخ انتشار	تصویب	تأیید	بررسی	تهیه	شرح	REV

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی										
صفحه: ۲		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		

## فهرست مطالب

- ۱- بتن ..... ۳
- ۱-۲- اندازه‌گیری سرعت پالس اولترا سونیک (UPV) ..... ۳
- ۱-۲- چکش اشمیت ..... ۴
- ۱-۳- آزمون میله ی وینزور و آزمون بیرون کشی ..... ۵
- ۱-۴- آزمون ترمولوماینسینس ..... ۵
- ۱-۵- آنالیز گرمایی دیفرانسیلی و آنالیز ترموگراویمتریک ..... ۶
- ۱-۶- آنالیز سنگ‌نگاری ..... ۶
- ۱-۶- آزمون از بین رفتن سختی ..... ۹
- ۱-۷- نفوذپذیری سطح ..... ۱۰
- ۱-۸- آزمایش رفتار آتش (FB test) ..... ۱۰
- ۱-۹- قلم و چکش ..... ۱۱
- ۲- فولاد ..... ۱۱

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی									 گروه مهندسیین RIFRPE	
صفحه: ۳		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		

## ۱- بتن

معمول‌ترین آزمایش مخربی که روی بتن صورت می‌گیرد، برداشتن هسته‌ی بتنی معمولاً به قطر  $40\text{ mm}$  از ناحیه آسیب دیده در آتش‌سوزی و آزمایش مقاومت فشاری این هسته بتنی طبق استانداردهای مربوطه *BS1881*: بخش ۱۲۰: ۱۹۸۳، می‌باشد. بعد از این کار مقاومت هسته‌ی بتنی را با استفاده از فرمول‌های تجربی به مقاومت مکعبی بتن مربوط می‌سازند. برای بررسی مقاومت‌های باقی‌مانده لازم است که از نمونه مراقبت به عمل بیاید و این هسته‌ی بتنی از جایی که آرماتوری در آنجا وجود ندارد استخراج شود، گرچه وجود آرماتور می‌تواند برای ارزیابی مقاومت‌های معادل مجاز باشد. مشکل دیگر سازه‌هایی که به شدت آسیب دیده‌اند این است که باید جایی را پیدا کنیم که هسته‌ای که از آن برداشت می‌شود، پیوستگی لازم برای آزمایش را داشته باشد. به علاوه لازم است که هسته‌هایی از یک ناحیه سالم در سازه که از بتنی با رده‌ی مشابه در آن استفاده شده است، برداشت شود. جهت ارزیابی بهتر مقاومت سازه، در صورت امکان بهتر است که از نتایج آزمایشات کنترلی مقاومت سیلندری و مکعبی اصلی که در هنگام ساخت سازه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، استفاده شود. به علاوه توجه به تغییر رنگ‌هایی که در هسته وجود دارد نیز می‌تواند مفید باشد چرا که با استفاده از آنها ممکن است بتوانیم مقاومت باقی‌مانده را در بخش‌هایی از سازه که امکان نمونه‌گیری از آنها وجود ندارد، ارزیابی کنیم. یک سری روش‌های آزمایشی غیر مخرب در دسترس قرار دارند (که در زیر به آنها خواهیم پرداخت)، ولی هیچ کدام خالی از اشکال نیستند.

## ۱-۲- اندازه‌گیری سرعت پالس اولترا سونیک (UPV)<sup>۲</sup>

گرچه ابزار مخصوص این آزمایش قاعدتاً به صورت پرتابل هستند، ولی نتایج حاصل از آن، خیلی دقیق نیستند و به علاوه اشکال مقایسه‌ای بودن در آنها وجود دارد، به عبارتی همیشه مرجعی باید وجود داشته باشد که در آن مقادیر اصلی مقاومت و سرعت پالس آورده شده باشد. آزمایش را می‌توان به دو صورت انجام داد. هم می‌توان زمان گذر کردن یک سیگنال از داخل عضو را اندازه گرفت و هم زمانی که طول می‌کشد که یک سیگنال از دستگاه فرستنده به دستگاه دریافت کننده‌ی سیگنال برسد (شکل ۱). در حالت اول داشتن دسترسی به هر دو سر عضو الزامیست و ضخامت عضو هم نباید از  $200\text{ mm}$  بیشتر باشد. در حالت دوم سطح باید به گونه‌ای باشد که این امکان را فراهم کند که یک سری قرائت داشته باشیم (و نه یکی)، همچنین مراحل مشابهی نیز باید برای بدست

<sup>۲</sup>( Ultrasonic Pulse Velocity measurements )

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی										
صفحه: ۴		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		

آوردن مقادیر مرجع انجام شود. زمانی که مقادیر مرجع سرعت پالس و مقاومت را داشته باشیم، می‌توانیم کاهش مقاومت را با استفاده از کاهش مقدار  $UPV$  تخمین بزنیم.

آزمایشات نشان داده‌اند که کاهش مقاومت  $(1 - \sigma_{c,\theta} / \sigma_{c,20})$  با کاهش سرعت پالس  $(1 - U_\theta / U_{20})$  رابطه‌ای خطی دارد که معادله‌ی زیر این مسأله را نشان می‌دهد:

$$\left(1 - \frac{\sigma_{c,\theta}}{\sigma_{c,20}}\right) = k_1 \left(1 - \frac{U_\theta}{U_{20}}\right) + k_2 \quad (1)$$

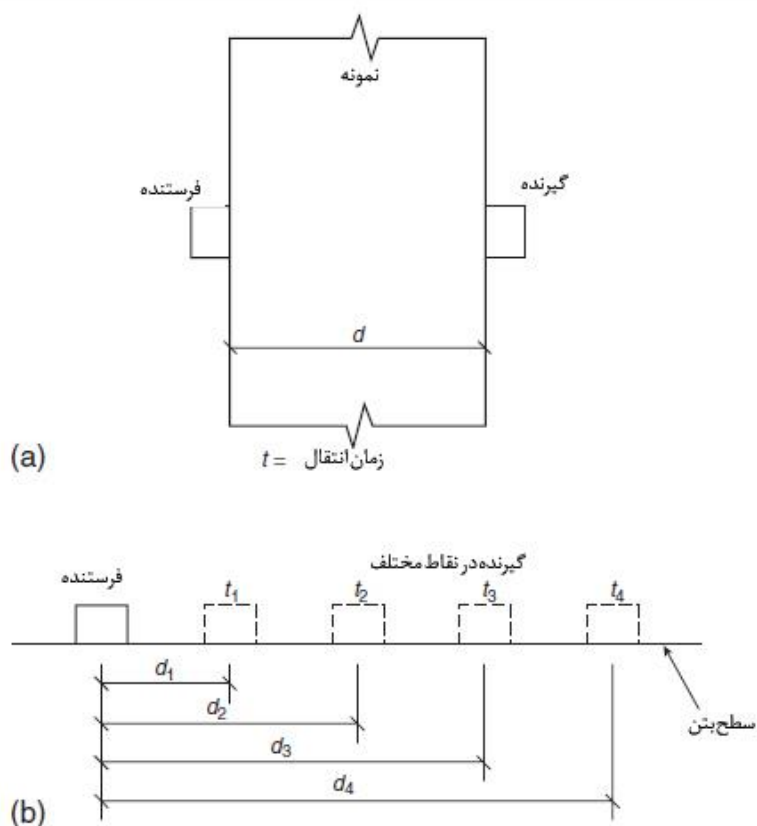
که در آن  $U_\theta, \sigma_{c,\theta}$  به ترتیب مقاومت فشاری و  $UPV$  در دمای  $\theta$  و  $U_{20}$  و  $\sigma_{c,20}$  به ترتیب مقاومت مرجع و  $UPV$  مرجع هستند و  $k_1$  و  $k_2$  به سن و ترکیب بتن وابسته‌اند. *Benedetti (1998)* روش پیچیده تری را ارائه داد که با استفاده از آن می‌توان کاهش مدول الاستیک را در ناحیه آسیب دیده در آتش با استفاده از انعکاس پالس بدست آورد. به پیشنهاد *Benedetti* کافی است که تغییر مدول الاستیک با دما را به صورت خطی نزولی مدل کنیم. چنین روشی تقریباً برای سطوح سالم پاسخ گو است.

## ۱-۲- چکش اشمیت<sup>۱</sup>

این روش فقط ویژگی‌های بتن را در نزدیک سطح آن بدست می‌دهد و برای اینکه نتایج قابل اعتمادی داشته باشیم باید سطح صاف و تمیزی داشته باشیم. همچنین، این روش برای یک نمونه بتن مشخص نیاز به کالیبراسیون دارد و در جایی که اطلاعات ما از مشخصات بتن به خود امان محدود می‌شود مناسب نیست.

<sup>1</sup> (Schmidt hammer)

صفحه: ۵	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV	پروژه:



شکل ۱: روش‌های انجام شده اندازه‌گیری *UPV* (a) روش مستقیم ( $V = d/t$ ) و (b) روش غیر مستقیم (سرعت با استفاده از شیب نمودار زمان - فاصله بدست می‌آید).

### ۱-۳- آزمون میله‌ی وینزور و آزمون بیرون کشی<sup>۲</sup>

این دو آزمون در کنار هم آورده شده‌اند، چرا که هر دوی آنها نیازمند سطح مناسبی برای آزمایش هستند. در مرجع *Nene and Kavle (1992)* نحوه‌ی استفاده از آزمایش میله‌ی وینزور برای تخمین مقاومت بتن درجا آسیب دیده در آتش شرح داده شده است اما در آن اطلاعات اندکی در مورد نتایج حاصله آورده شده است.

### ۱-۴- آزمون ترمولومینیسنس<sup>۱</sup>

در این آزمایش تنها به نمونه‌ی کوچکی از ملات نیاز است و در واقع هسته‌هایی با قطر بسیار کوچک تحت این آزمایش قرار می‌گیرند. با انجام مطالعات روی تغییرات سیلیکای موجود در نمونه، می‌توان دمایی که بتن به

<sup>2</sup> (Windsor probe and pull out test)

<sup>1</sup> (Thermoluminescence test)

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی										
صفحه: ۶		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		

آن رسیده بود را تعیین کرد. البته این آزمایش نیازمند تجهیزات ویژه‌ای است که ممکن است به سادگی در دسترس نباشند.

### ۱-۵- آنالیز گرمایی دیفرانسیلی و آنالیز ترموگراویمتریک<sup>۲</sup>

هم از آنالیز گرمایی دیفرانسیلی (DTA) و هم از آنالیز ترموگراویمتریک (TGA) می‌توان جهت ارزیابی تغییرات در ساختار بتن به هنگام قرارگیری در معرض آتش استفاده کرد. این روش‌ها بر اساس تغییر الگوی پاسخ در اثر دما با توجه به تغییرات فیزیوشیمیایی سیمان می‌باشند. در مرجع (Short, Purkiss and Guise (2000) آورده شده است که DTA/TGA فقط برای سیمان‌های غیر آمیخته مناسب هستند. سیمان‌های دارای خاکستر بادی (PFA) یا سیمان‌های دارای سرباره‌ی دانه‌ای کوره‌ی بلند (GGBS) به هنگام قرارگیری در معرض دما یا هیچ تغییری در پاسخ خود نشان نمی‌دهند و یا تغییر اندکی از خود نشان می‌دهند.

### ۱-۶- آنالیز سنگ‌نگاری<sup>۳</sup>

در این تکنیک، بخش‌های بسیار باریکی از هسته‌ی بتنی زیر میکروسکوپ آزمایش می‌شوند و ایزوتروپی، چگالی و نوع ترک در آنها بررسی می‌شود. به گفته‌ی Riley (1991) وقتی دما از 500 °C تجاوز می‌کند، خمیر سیمان زیر نور پلاریزه به صورت غیر ایزوتروپیک دیده می‌شود. علاوه بر آن الگوی ترک‌ها نیز تغییر می‌کند: در دمای زیر 300 °C ترک‌ها در مرزهای بین ملات سیمان و سنگدانه ایجاد می‌شوند، در حالی که در دمای بالای 500 °C این ترک‌ها از داخل ملات عبور می‌کنند. بر اساس آخرین تحقیقات می‌توان رابطه‌ای بین چگالی ترک‌ها و دمایی که در اثر حرارت در بتن ایجاد شده بود را پیدا کرد (شکل ۲). استثنایی که وجود دارد، بتن با سنگدانه‌ی سیلیسی شامل PFA است که توضیحی برای آن وجود ندارد. اگر این استثنا را در نظر نگیریم، می‌توان گفت که رابطه‌ی بین دما  $\sigma_{cd}$  که در آن چگالی ترک‌ها از مقدار پایه‌ی آن بیشتر می‌شود و دمای  $\sigma_{cs}$  که در آن مقاومت فشاری رو به کاهش می‌گذارد، قابل قبول است (جدول ۱). قابلیت تغییر چگالی ترک جهت پیدا کردن ایزوترم 325 °C (که در آن مقاومت فشاری رو به کاهش می‌گذارد) در شکل ۳ نشان داده شده است.

<sup>2</sup> (Differential thermal analysis and thermogravimetric analysis)

<sup>3</sup> (Petrographic analysis)

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی



گروه مهندسين  
دانشگاه تهران

صفحه: ۷

DEP

PRJ

CAT

DIS

TYP

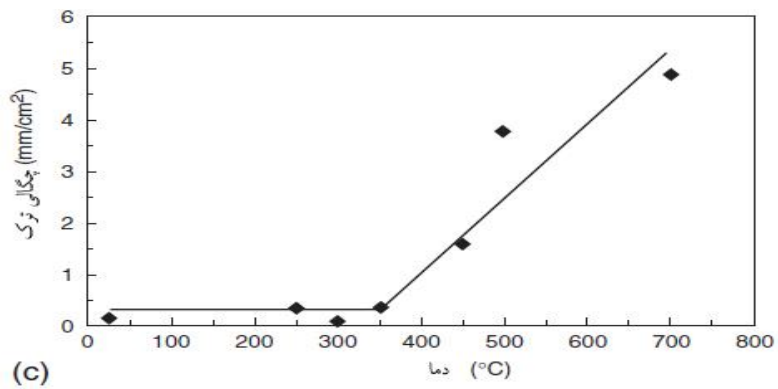
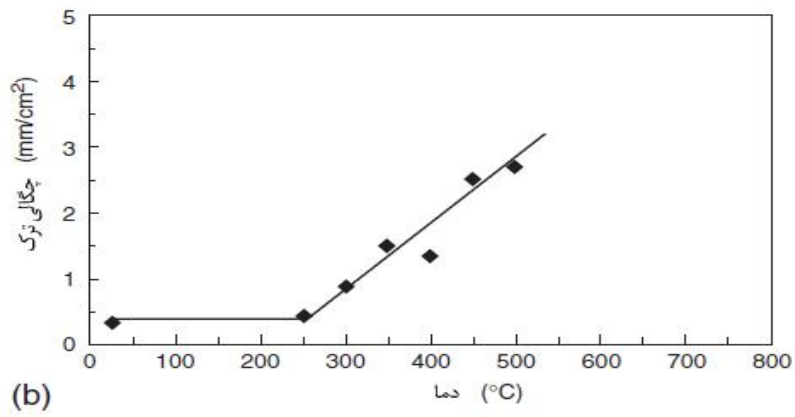
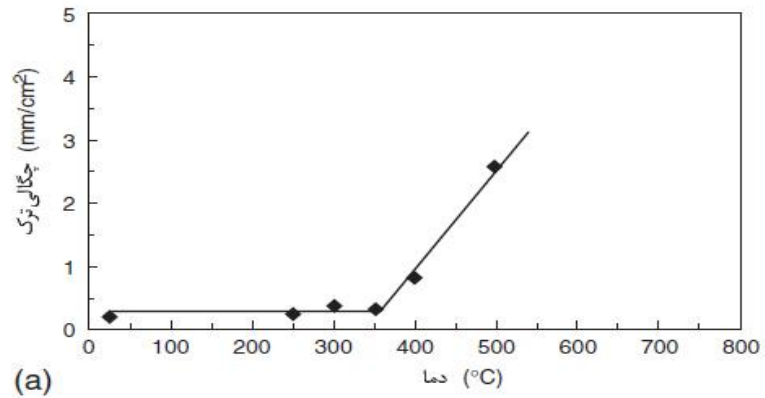
SEQ

REV

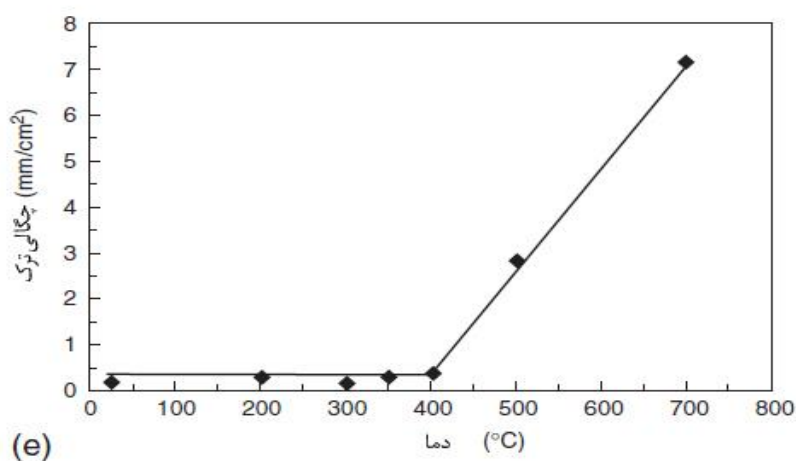
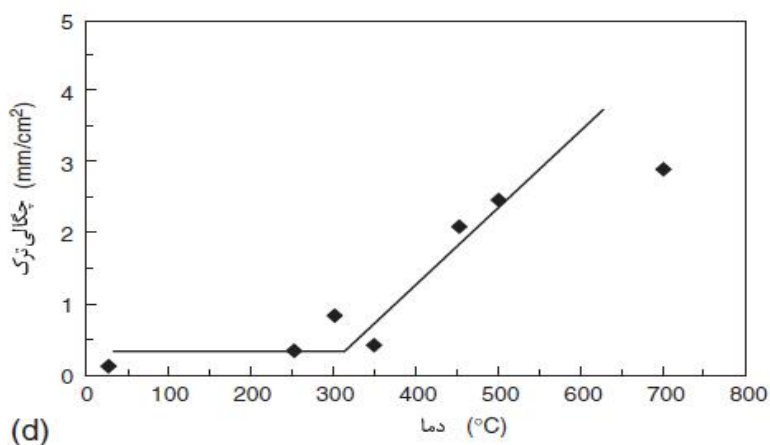
پروژه:

شهریور ۹۴

۰۱



<b>آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی</b>										
صفحه: ۸		<i>DEP</i>	<i>PRJ</i>	<i>CAT</i>	<i>DIS</i>	<i>TYP</i>	<i>SEQ</i>	<i>REV</i>		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		



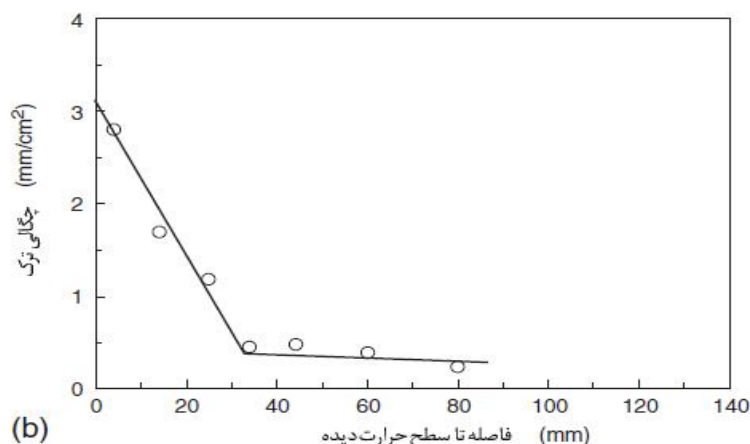
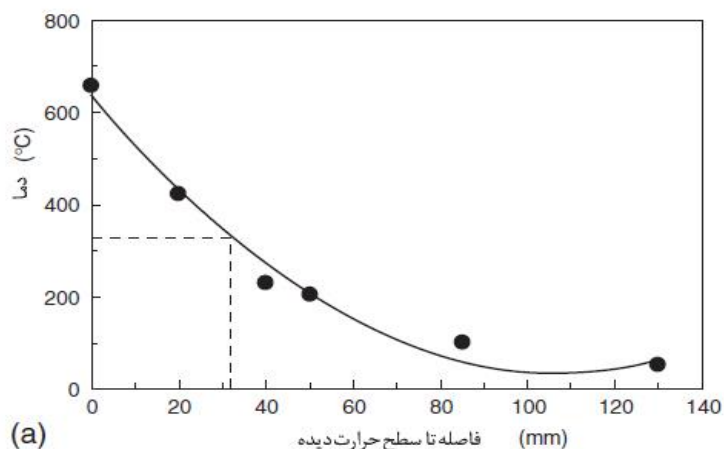
شکل ۲: تغییرات چگالی ترک با دما برای بتن‌های ساخته شده از سنگدانه سیلیسی و (a) سیمان پرتلند معمولی (OPC)؛ (b) OPC/PFA؛ (c) سیمان‌های OPC/GGBS؛ (d) آهک و (e) گرانیت

جدول ۱: مقادیر چگالی ترک اولیه و دماهای تغییر مقاومت

نوع بتن	چگالی ترک اولیه ( $C_0$ ) mm/cm <sup>2</sup>	$\theta_{cd}$ (°C)	$\theta_{cs}$ (°C)
OPC/Siliceous	0.29	350	325
OPC/PFA/Siliceous	0.36	250	325
OPC/GGBS/Siliceous	0.26	350	350
OPC/Limestone	0.31	300	325
OPC/Granite	0.24	400	400



آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی								پروژه:	گروه مهندسين دانشگاه تهران
صفحه: ۹		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ		
شهریور ۹۴									



شکل ۳: (a) توزیع دما و (b) چگالی ترک نمونه‌ی سیلندری بتنی با سنگدانه‌ی سیلیسی که از یک انتها حرارت دیده.

### ۱-۶- آزمون از بین رفتن سختی<sup>۱</sup>

این آزمون در واقع نوعی آزمون فشاری است که روی نمونه‌ی سیلندری به طول 175mm و قطر 75mm تحت تنش‌هایی بین ۰ تا حدود 4.5Mpa و تحت بارگذاری سیکلی انجام می‌شود. در این آزمایش، کرنش‌ها تا 67mm از مرکز اندازه‌گیری می‌شوند.

سپس از این کرنش‌ها برای محاسبه مدول الاستیک‌های مختلفی که در فاصله بین سیکل‌های بارگذاری بدست می‌آیند، استفاده می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ی بتنی که به صورت یکنواخت تا دمای ۴۷۰ درجه سانتیگراد حرارت دیده است، داده‌های مربوط به مدول پسماند یانگ را تایید می‌کند و می‌تواند روشی

<sup>1</sup>(Stiffness damage test)

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی										
صفحه: ۱۰		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		

دیگر را برای ارزیابی عملکرد بتن در دماهای متوسط ارائه کند. به درستی معلوم نیست که گرادیان گرمایی نمونه چه تأثیری بر نتایج خواهد گذاشت.

## ۱-۷- نفوذپذیری سطح

Montgomery (1997) روشی را ارائه داد که طی آن با استفاده از نفوذ هوا و آزمایش عبور آب روی بتن حرارت دیده، می‌شد میزان خرابی را بر اساس مقاومت کششی خردشدگی و با استفاده از دیسک فولادی به قطر 50mm که با اپوکسی مقید شده، اندازه‌گیری کرد. نمونه‌های مکعبی 150mm در این آزمایش به مدت دو ساعت، در شعله‌ی معین و با دمای سطحی معین، حرارت دیدند. مقاومت‌های کششی حاصل، سطحی خواهند بود (به دلیل نفوذپذیری هوا و عبور آب)، اما مقاومت‌های مکعبی تا حدی تابعی از توزیع دما در نمونه خواهند بود. به هر حال داده‌هایی که از آزمایش‌ها گزارش شده اند، محدود هستند، در حالی که این روش رابطه‌ی قابل قبولی از نفوذ هوا،  $API$  و مقاومت کششی خردشدگی  $f_{t,\theta}$ ، ارائه می‌دهد:

$$\left(1 - \frac{f_{t,\theta}}{f_{t,20}}\right) = -0.00814 \left(1 - \frac{API_{\theta}}{API_{20}}\right) \quad (R^2 = 0.826) \quad (2)$$

معادلات مشابهی را می‌توان برای پارامترهای دیگر بدست آورد، اما مقدار  $R^2$  در تمام موارد حدود ۰,۵ می‌باشد که نشان دهنده درگیری ضعیف است.

## ۱-۸- آزمایش رفتار آتش (FBtest)<sup>۱</sup>

در مرجع dos Santos, Branco and de Brito (2002) آزمایشی ارائه داده اند که در آن هسته‌ی گرفته شده از ساختمان آسیب‌دیده در آتش به دو دیسک به ضخامت 15mm تقسیم می‌شود و میزان جذب آب اندازه گرفته می‌شود. طبق گزارش موجود در این مرجع در نزدیکی سطحی که در معرض آتش آسیب دیده، میزان جذب آب بالاست، در حالی که در ناحیه‌ای دورتر از سطح میزان جذب آب به یک مقدار تقریباً ثابت نزول پیدا می‌کند. درصد افزایش جذب آب ( $WA$ ) نسبت به مقدار میانه‌ی آن بر حسب دما  $\theta$  با معادله‌ی زیر ارائه می‌شود:

$$WA = 0.5 + \frac{4}{300}(\theta - 200) \quad (R^2 = 0.831) \quad (3)$$

الگوی مشابهی جهت محاسبه‌ی مقاومت سیلندر شکافتگی دیکس‌ها وجود دارد، و کاهش مقاومت کششی شکافتگی در مقابل دما به صورت زیر تعریف می‌شود:

<sup>1</sup> (Fire behaviour test)

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی									
صفحه: ۱۱	DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴							۰۱		

$$f_{t,20} - f_{t,\theta} = 1.35 + 3.5 \times 10^{-3}(\theta - 200) \quad (4)$$

و یا اگر از مقدار محیطی  $f_{t,20}$  معادل  $2,4 \text{ MPa}$  استفاده کنیم، معادله‌ی (۴,۱۳) به فرم زیر درمی‌آید:

$$f_{t,\theta} = 1.75 - 3.5 \times 10^{-3}(\theta - 200) \quad (5)$$

معادله‌ی ۵ در دمای  $500^\circ\text{C}$  مقاومت کششی شکافتگی را برابر صفر بدست می‌دهد که در واقعیت نیز مقدار

این مقاومت عددی بسیار کوچک است.

## ۱-۹- قلم و چکش<sup>۱</sup>

اگرچه این روش، روشی علمی نیست ولی می‌توان گفت که بهترین روش موجود جهت ارزیابی سریع کیفیت و مقاومت بتن محسوب می‌شود، گرچه روشی خام و ناپخته است.

چشم‌اندازی به آزمایش غیرمخرب روی بتن آسیب‌دیده در آتش در مرجع *Muenow and Abrams (1987)* آورده شده است.

در مورد آرماتورها هم روش‌های مشابهی برای فولاد سازه‌ای وجود دارند. البته لازم به ذکر است که وقتی نمونه‌ها از فولاد کششی در تیرها و فولاد فشاری در ستون‌ها برداشته می‌شوند، آن‌المان یا آن‌سازه را باید تخریب کرد، چرا که برداشت آن نمونه به معنی کاهش مقاومت عضو است. البته می‌توان نمونه‌ها را از لینک‌های برشی موجود در وسط تیر یا ستون برداشت کرد، بدون اینکه تخریب صورت گیرد.

## ۲- فولاد

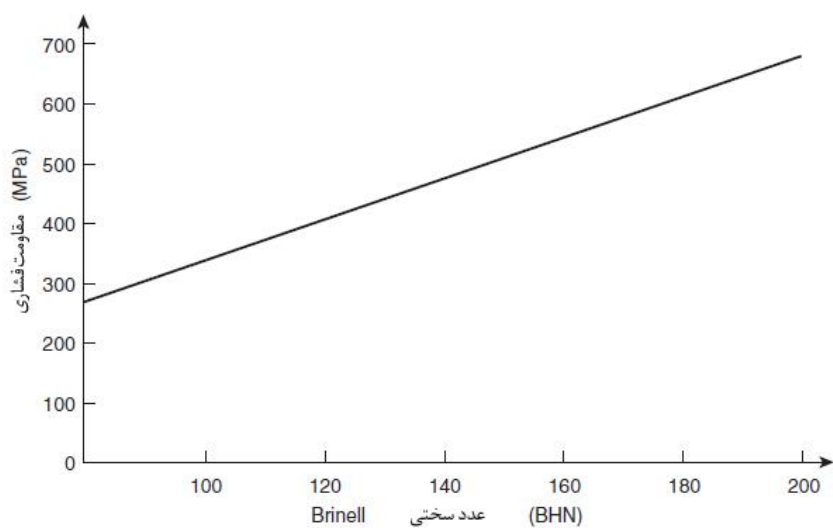
دو روش اصلی جهت تخمین مقاومت باقی‌مانده‌ی فولاد موجود است. روش اول مبتنی بر برداشت نمونه و بررسی مقاومت آن تحت آزمایش کشش استاندارد است. البته باید توجه و دقت لازم را به خرج داد تا با خروج نمونه، سازه بیش از حد سست نشود و تنها نمونه‌های ضروری برداشت شوند.

روش دوم، استفاده از آزمون‌های غیرمخرب است که مناسب‌ترین آنها آزمون تخریس سختی<sup>۲</sup> است که معمولاً سختی *Brinell* را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی مستقیم تقریباً خطی بین عدد سختی *Brinell* (*BHN*) و مقاومت کششی وجود دارد (شکل ۴). نکته‌ی قابل توجه این است که در استفاده از این آزمایش باید احتیاط کرد، یعنی برای اینکه مقاومت تخمینی از نظر آماری قابل قبول باشد نیازمند چندین جواب از آزمایش هستیم.

<sup>1</sup> (Hammer and chisel)

(<sup>2</sup> Hardness indentation test)

آزمایش‌های ارزیابی سازه‌های آسیب دیده در آتش‌سوزی										
صفحه: ۱۲		DEP	PRJ	CAT	DIS	TYP	SEQ	REV		پروژه:
شهریور ۹۴								۰۱		



شکل ۴: رابطه‌ی بین مقاومت‌های فولاد و عدد سختی *Brinell* (BHN)