بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيمِ

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
دانشکده فنی مهندسی
گروه سازه

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد
رشته مهندسی عمران، سازه

# بررسی نظری پارامترهای مکانیک شکست بتن سبک سازه‌ای ساخته شده از سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس

استاد راهنما
دکتر علیرضا انتظاری

پژوهشگر
حمید عمران زاده

بهمن / ۱۳۹۳
تبریز / ایران

**تقدیم به :**

**مادر عزیز و دلسوزم**

**که لحظه لحظه زندگی خود را مدیون دلگرمی و محبت‌های بی‌دریغ او هستم**

# تشکر و قدردانی:

قسم به قلم، زبان قاصر از بیان سپاسی شایسته از تمام زحمات بی‌دریغ حامیانم می‌باشد. بدینوسیله از زحمات جناب آقای دکتر علیرضا انتظاری که به عنوان استاد راهنمای پایان‌نامه، در تمام مراحل با راهنمائیهای عالمانه و در اختیار قرار دادن اوقات ارزشمندشان جهت به ثمر رساندن این پایان‌نامه رهگشایم بودند، سپاسگزاری می‌نمایم .

حمید عمران زاده

بهمن ماه۱۳۹۳

تبریز،ایران

# فهرست مطالب

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ج

فهرست جداول ..... ح

فهرست اشکال ..... خ

چکیده ..... یک

**فصل اول: مقدمه ..... ۱**

۱-۱ پیشگفتار ..... ۱

۱-۲ مزایای کاربرد بتن سبک ..... ۲

۱-۳ چگونگی تولید بتن سبک ..... ۲

۱-۳-۱ بتن سبک سازه‌ای ..... ۳

۱-۴ مکانیک شکست ..... ۳

۱-۵ تقسیم‌بندی پایان‌نامه ..... ۴

**فصل دوم: بررسی منابع ..... ۶**

۲-۱ سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس ..... ۶

۲-۱-۱ خصوصیات مکانیکی LWA ..... ۹

۲-۲ روشهای موجود در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی برای شکست ..... ۱۰

۲-۲-۱ بررسی مساله شکست از دیدگاه تمرکز تنش ..... ۱۰

۲-۳ مکانیک شکست ..... ۱۲
۲-۳-۱ دسته‌بندی مواد ..... ۱۲
۲-۳-۲ رویکردهای مکانیک شکست ..... ۱۴
۲-۴ مفهوم مد شکست ..... ۱۵
۲-۴-۱ انواع مدهای شکست ..... ۱۵
۲-۵ مکانیک شکست الاستیک خطی ..... ۱۶
۲-۶ ضریب شدت تنش ..... ۱۷
۲-۷ معیار انرژی شکست (معیار نرخ رهایی انرژی) ..... ۲۰
۲-۸ مکانیک شکست غیرخطی ..... ۲۲
۲-۹ مفهوم انتگرال j ..... ۲۵
۲-۱۰ معیار بازشدگی ترک ..... ۲۶
۲-۱۱ مدلهای مکانیک شکستی غیرخطی بتن ..... ۲۷
۲-۱۲ مدل ترک چسبنده ..... ۳۰
۲-۱۲-۱ مدل ترک مجازی هیلربورگ ..... ۳۱
۲-۱۳ اندازه‌گیری پارامترهای شکست بتن ..... ۳۳
۲-۱۳-۱ روش RILEM برای اندازه‌گیری $G_f$ ..... ۳۳
۲-۱۳-۲ آیین‌نامه بتن ژاپن برای اندازه‌گیری انرژی شکست کل $G_f$ ..... ۳۴
۲-۱۳-۳ تعیین چقرمگی شکست $(K_{Ic})$ ..... ۳۶
۲-۱۳-۴ روشهای غیرمستقیم ..... ۳۸
۲-۱۴ انواع روشهای حل مسائل مهندسی ..... ۳۹
۲-۱۴-۱ روشهای عددی در مکانیک شکست ..... ۳۹
۲-۱۴-۱-۱ الگوی ترک گسسته ..... ۴۰

۲-۱۴-۱-۲ الگوی ترک چسبنده ..... ۴۱
۲-۱۴-۱-۳ روشهای نرمی در مکانیک شکست ..... ۴۲
۲-۱۴-۱-۴ الگوی ترک پخش شده ..... ۴۳
۲-۱۵ تنش تکین در نوک ترک ..... ۴۵
۲-۱۶ اثر اندازه ..... ۴۶
۲-۱۶-۱ عوامل وابستگی مقاومت سازه به اندازه‌ی آن ..... ۴۹
۲-۱۶-۱-۱ اثر اندازه آماری ..... ۴۹
۲-۱۶-۱-۱ اثر اندازه مکانیک شکست ..... ۵۰

**فصل سوم: مواد و روشها ..... ۵۱**

۳-۱ مقدمه ..... ۵۱
۳-۲ معرفی مصالح ..... ۵۱
۳-۲-۱ سنگدانه‌های سبک ..... ۵۲
۳-۲-۲ سنگدانه‌های طبیعی معمولی ..... ۵۴
۳-۲-۳ سیمان ..... ۵۵
۳-۲-۴ فوق روان کننده ..... ۵۵
۳-۲-۵ میکروسیلیس ..... ۵۶
۳-۳ تولید LWAC ..... ۵۶
۳-۴ تعیین پارامترهای مکانیک شکست نمونه‌های تجربی انتظاری (۱۳۹۱) ..... ۵۸
۳-۴-۱ روش آزمایش در کارهای تجربی انتظاری (۱۳۹۱) ..... ۵۹
۳-۵ واحد انتخابی در آباکوس ..... ۶۰
۳-۶ ماژولهای نرم‌افزار آباکوس ..... ۶۱

۳-۶-۱ ماژول Part ..... ۶۱
۳-۶-۲ ماژول Property ..... ۶۲
۳-۶-۲-۱ خواص الاستیک ..... ۶۷
۳-۶-۲-۲ خواص پلاستیک ..... ۶۸
۳-۶-۲-۲-۱ مدل ترک پخش شده ..... ۶۹
۳-۶-۲-۲-۱-۱ پارامترهای مدل ترک پخش شده ..... ۶۹
۳-۶-۲-۲-۲ مدل ترک ترد ..... ۷۰
۳-۶-۲-۲-۳ مدل پلاستیسیته آسیب بتن ..... ۷۱
۳-۶-۲-۳ خواص آسیب ..... ۷۵
۳-۶-۲-۴ اختصاص دادن ضخامت به نمونه‌ها ..... ۷۷
۳-۶-۳ ماژول Assembly ..... ۷۷
۳-۶-۴ ماژول Step ..... ۷۹
۳-۶-۵ ماژول Interaction ..... ۸۱
۳-۶-۶ ماژول Load ..... ۸۳
۳-۶-۷ ماژول Mesh ..... ۸۴
۳-۶-۷-۱ مش‌بندی مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۴
۳-۶-۷-۲ مش‌بندی مدلهای بر مبنای ترک ناحیه غنی شده (XFEM) ..... ۸۸
۳-۷ مدلسازی اثر اندازه ..... ۹۰

**فصل چهارم: بررسی نتایج ..... ۹۳**

۴-۱ ماژول (Visualization) ..... ۹۳
۴-۲ منحنی بار- تغییرمکان قائم محل اعمال بار ..... ۹۴
۴-۳ منحنی بار- بازشدگی دهانه ترک ..... ۱۰۱

۴-۴ محاسبه انرژی شکست در واحد سطح ترک ($G_f$)..... ۱۰۷
۴-۴-۱ روش کمیته RILEM جهت محاسبه انرژی شکست در واحد سطح ترک..... ۱۰۷
۴-۴-۲ روش آیین‌نامه بتن ژاپن (JCI) جهت محاسبه انرژی شکست در واحد سطح ترک..... ۱۰۸
۴-۵ محاسبه چقرمگی شکست..... ۱۱۰
۴-۵-۱ چقرمگی شکست غیرمستقیم..... ۱۱۰
۴-۵-۲ چقرمگی شکست..... ۱۱۲
۴-۵-۲-۱ چقرمگی شکست مدلسازیهای بر مبنای ترک کانتوری..... ۱۱۲
۴-۵-۲-۲ چقرمگی شکست از روی منحنی P-δ و منحنی P-CMOD..... ۱۱۳
۴-۶ بحث نتایج..... ۱۱۵
۴-۷ نتایج اثر اندازه روی چقرمگی شکست نمونه‌ها..... ۱۱۸

**فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۲۱**
۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۱۲۱
۵-۲ پیشنهادات برای ادامه کار..... ۱۲۴

منابع و مآخذ..... ۱۲۵
ABSTRACT..... ۱۲۸

# فهرست علائم و نشانه‌ها

| | |
|---|---|
| $a$ | طول ترک جدید |
| $a_0$ | طول ترک اولیه |
| $a_c$ | طول ترک بحرانی در لحظه شکست |
| $\beta_t$ | ضریب قفل و بست دانه‌ای در حین رشد ترک |
| $CMOD_c$ | بازشدگی بحرانی دهانه ترک (در موقع خرابی) |
| $CTOD_c$ | بازشدگی بحرانی نوک ترک (در موقع خرابی) |
| $D_{cr}$ | درایه‌های ماتریس سختی مصالح ترک خورده |
| $E$ | مدول الاستیسیته مصالح |
| $E_{sec}$ | مدول الاستیسیته سکانتی مصالح (از نقطه ابتدا تا نقطه بار حداکثر) |
| $FPZ$ | منطقه فرآیند شکست |
| $f_c'$ | مقاومت فشاری بتن |
| $f_c$ | تنش فشاری بتن |
| $f_t$ | مقاومت کششی بتن |
| $g_1(\alpha_c)$ | تابع هندسی (ضریب شکل) |
| $G_F$ | انرژی شکست در واحد سطح ترک |
| $G_\sigma$ | انرژی لازم جهت غلبه بر تنشهای چسبنده در واحد سطح ترک |
| $G_{Ic}$ | نرخ آزادسازی انرژی برای ایجاد سطوح جدید ترک در واحد سطح ترک |
| $h$ | ارتفاع نمونه |
| $ITZ$ | مرز تماس سنگدانه با ملات |
| $K_{IC}$ | چقرمگی شکست یا طاقت مصالح در مود اول شکست |

| | |
|---|---|
| $K'_{Ic}$ | چقرمگی شکست غیرمستقیم در مود اول شکست |
| L | طول کلی تیر |
| LWA | سنگدانه‌های سبک وزن |
| LWAC | بتن ساخته شده از سنگدانه‌های سبک |
| PA | سنگدانه پومیس |
| r, θ | مختصات قطبی جلوی نوک ترک |
| R | مقاومت رشد ترک |
| S | دهانه بارگذاری شده تیر |
| SA | سنگدانه اسکوریا |
| u | جابجایی در جهت x محورهای مختصات |
| v | جابجایی در جهت y محورهای مختصات |
| w | جابجایی در جهت z محورهای مختصات |
| $W_0$ | مساحت زیر منحنی که از آزمایش حاصل شده است |
| $W_1$ | مساحت زیر منحنی ناشی از وزن تیر |
| $W_2$ | مساحت زیر منحنی ناشی از وزن تجهیزات نصب شده روی تیر |
| $W_t$ | مساحت زیر منحنی کل |
| XFEM | روش المان محدود توسعه یافته (غنی شده) |
| Π | مجموع انرژی پتانسیل جسم ترکدار |
| $\gamma_s$ | انرژی سطحی الاستیک |
| $\gamma_P$ | کار کرنش پلاستیک |

# فهرست جداول


جدول۲-۱- مقایسه خصوصیات شیمیایی و فیزیکی پومیس و سیمان (Khandaker، 2004)..... ۷

جدول۲-۲- محدوده چقرمگی شکست برای انواع مصالح (Wikipedia، 2014)..... ۳۸

جدول۳-۱- تجزیه شیمیایی مصالح مصرفی (انتظاری، ۱۳۹۱)..... ۵۳

جدول۳-۲- دانه‌بندی سنگدانه‌های سبک و معمولی بر حسب درصد وزنی رد شده (انتظاری، ۱۳۹۱)..... ۵۳

جدول ۳-۳- مشخصات سنگدانه‌ها (انتظاری، ۱۳۹۱)..... ۵۵

جدول ۳-۴- مقادیر اجزای تشکیل دهنده مخلوط‌های بتن سبک انتظاری (۱۳۹۱) بر حسب($Kg/m^3$)..... ۵۷

جدول ۳-۵- اندازه نمونه‌های آزمایش خمش سه نقطه‌ای (انتظاری، ۱۳۹۱)..... ۵۸

جدول ۳-۶- خصوصیات مکانیکی LWAC استفاده شده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای (انتظاری، ۱۳۹۱)..... ۵۹

جدول ۳-۷- سیستم واحدهای متری و میلی‌متری پیشنهادی جهت کاربرد در آباکوس (معیری و همکاران، ۱۳۹۲).. ۶۰

جدول ۳-۸- مدول الاستیسیته نمونه‌های مدلسازی شده در آباکوس..... ۶۷

جدول ۳-۹- داده‌های تنش- کرنش پلاستیک معادل، ورودی در نرم‌افزار آباکوس..... ۷۱

جدول ۳-۱۰- داده‌های ورودی مربوط به جابجایی بحرانی ($U_{to}$) برای بیان نرم‌شوندگی کششی به آباکوس..... ۷۴

جدول ۳-۱۱- داده‌های ورودی مربوط به معیار آسیب در آباکوس..... ۷۵

جدول ۳-۱۲- ابعاد تیرهای مدلسازی شده در آباکوس جهت بررسی اثر اندازه..... ۹۱

جدول۴-۱- اطلاعات تعیین انرژی شکست (در واحد سطح ترک) به روش RILEM..... ۱۰۷

جدول۴-۲- اطلاعات تعیین انرژی شکست (در واحد سطح ترک) به روش JCI..... ۱۰۹

جدول ۴-۳- تعیین چقرمگی شکست غیرمستقیم..... ۱۱۰

جدول ۴-۴- چقرمگی شکست مدلهای بر اساس ترک کانتوری..... ۱۱۳

جدول ۴-۵ چقرمگی شکست مدلهای بر اساس ترک غنی‌شده از روی نمودارهای P-δ و P- CMOD..... ۱۱۴

جدول ۴-۶- چقرمگی شکست در مدلسازیهای اثر اندازه..... ۱۱۹

# فهرست اشکال


شکل۲-۱- سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس (Anwar Hossain، 2004) ..... ۷

شکل۲-۲- ساختار درونی یک نوع مشخصی از LWA با چگالی متفاوت (Kilic و همکاران، 2009) ..... ۸

شکل۲-۳- مسیر رشد ترک در بتن معمولی و بتن ساخته شده از سنگدانه‌های سبک (Russell، 2009) ..... ۹

شکل۲-۴- نمونه‌ای از شکست سازه‌ها در اثر رشد ترک که طراحی آنها کاملا بر مبنای آیین‌نامه‌های متعارف بود .... ۱۰

شکل۲-۵- توزیع تنشها در حوالی سوراخ (میرزایی نصیرآباد و همکاران، ۱۳۸۸) ..... ۱۱

شکل۲-۶- منحنی تیپ تنش- کرنش انواع مواد (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۱۲

شکل۲-۷- دسته‌بندی مصالح از دیدگاه مکانیک شکست (Bazant، 2002) ..... ۱۳

شکل۲-۸- انواع مودهای شکست (Saouma، 2014) ..... ۱۶

شکل۲-۹- میدان تنش در حوالی نوک ترک برای رابطه ایروین (Saouma، 2012) ..... ۱۷

شکل۲-۱۰- پارامترهای تعیین رابطه چقرمگی تیر تحت خمش سه‌نقطه‌ای (Bazant، 2002) ..... ۱۹

شکل۲-۱۱- توجیه افزایش مقاومت رشد ترک در حین گسترش ترک (Kruzic، 2004) ..... ۲۱

شکل۲-۱۲- مکانیزم‌های جذب انرژی در طی رشد ترک بعلت ماهیت ناهمگنی مصالح (Kruzic، 2004) ..... ۲۳

شکل۲-۱۳- تخمین اندازه‌ی منطقه‌ی پلاستیک در جلوی نوک ترک بر اساس معادلات ایروین(Saouma، 2007) .... ۲۳

شکل۲-۱۴- منطقه‌ی پلاستیک در جلوی نوک ترک بر اساس معیار وان‌مایزز (Saouma، 2007) ..... ۲۴

شکل۲-۱۵- منطقه‌ی پلاستیک در جلوی نوک ترک در مدلسازی نرم‌افزاری در حین رشد ترک (Saouma، 2007) .. ۲۴

شکل۲-۱۶- تغییرات شکل منطقه‌ی پلاستیک در جلوی نوک ترک و در راستای عرض ترک (Kruzic ، 2004) ..... ۲۵

شکل۲-۱۷- انتگرال j (Zhang، 1990) ..... ۲۵

شکل۲-۱۸- بازشدگی دهانه ترک (Tom، 2011) ..... ۲۶

شکل۲-۱۹- مدل ترک چسبنده (Gladwell، 2010) ..... ۳۰

شکل۲-۲۰- مدل ترک مجازی هیلربورگ (اصفهانی، ۱۳۸۶) ..... ۳۱

شکل۲-۲۱- انواع نرم‌شوندگی کششی در بتن (Ingraffea، 2010) ..... ۳۲

شکل۲-۲۲- پارامترهای آزمایش تعیین انرژی شکست به روش کمیته‌ی RILEM (RILEM، 2008) ..... ۳۴

شکل۲-۲۳- نحوه‌ی آزمایشP-CMOD (JCI، 2010) ..... ۳۵
شکل۲-۲۴- الگوی ترک گسسته (Zhang و Chen، 2003) ..... ۴۰
شکل۲-۲۵- الگوی ترک چسبنده (Ingraffea، 2010) ..... ۴۱
شکل۲-۲۶- المانهای تکین در نوک ترک (Dominguez و همکاران، 1997) ..... ۴۶
شکل۲-۲۷- آزمایش تعیین اثر اندازه (Bazant و Planas، 1998) ..... ۴۷
شکل۲-۲۸- وابستگی مقاومت سازه به اندازه آن (Bazant و Planas، 1998) ..... ۴۸
شکل۲-۲۹- وابستگی شکل‌پذیری سازه به اندازه آن (Bazant و Planas، 1998) ..... ۴۸
شکل۲-۳۰- آزمایشات گریفیت روی فیبرهای شیشه (Bazant و Pang، 2006) ..... ۵۰
شکل۳-۱- سنگدانه های اسکوریا و پومیس استفاده شده در کارهای تجربی انتظاری (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۵۲
شکل۳-۲- نحوه انجام آزمایش تعیین مقاومت دانه‌ای سنگدانه‌ها (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۵۴
شکل۳-۳- مشخصات آزمایش تیر شکافدار (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۵۹
شکل۳-۴- منحنی تیپ تنش- کرنش فشاری بتن معمولی (رمضانیانپور و شاه نظری، ۱۳۹۰) ..... ۶۳
شکل۳-۵- مقایسه‌ی منحنی‌های تیپ تنش- کرنش بتن معمولی و بتن سبکدانه (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۶۴
شکل۳-۶- اختصاص خواص الاستیک به نمونه S8 در آباکوس ..... ۶۸
شکل۳-۷- اختصاص خواص پلاستیک به نمونه S8 در آباکوس در هر دو روش مدلسازی ترک (کانتوری و غنی‌شده) ..... ۷۲
شکل۳-۸- نحوه در نظر گرفتن نرم‌شوندگی کششی در نرم‌افزار آباکوس (Abaqus، 2014) ..... ۷۳
شکل۳-۹- اختصاص خواص نرم‌شوندگی کششی به نمونه S8 در آباکوس در هر دو روش مدلسازی ترک (کانتوری و غنی‌شده) ..... ۷۴
شکل۳-۱۰- اختصاص خواص آسیب به نمونه S8 در آباکوس در هر دو روش مدلسازی ترک (کانتوری و غنی‌شده) ..... ۷۶
شکل۳-۱۱- اختصاص خواص گسترش آسیب به نمونه S8 در آباکوس تنها به مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۷۶
شکل۳-۱۲- اختصاص ضخامت به همه‌ی تیرها (بجز مدلهای اثر اندازه) ..... ۷۷
شکل۳-۱۳- جایگذاری اجزا در محل خود در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۷۸

شکل۳-۱۴- جایگذاری اجزا در محل خود در مدلهای بر مبنای ترک ناحیه غنی‌شده ..... ۷۹
شکل۳-۱۵- مشخص کردن خروجی از نوع چقرمگی شکست در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۱
شکل۳-۱۶- تماس غلتکها با وجوه تیر و مشخص کردن مکان ترک (مدلهای ترک کانتوری) ..... ۸۲
شکل۳-۱۷- اختصاص خاصیت تکین شدن به المانهای حوالی نوک ترک در مدلهای ترک کانتوری ..... ۸۳
شکل۳-۱۸- اختصاص المانهای مثلثی به ناحیه داخل دایره اول در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۵
شکل۳-۱۹- اختصاص المانهای مستطیلی از نوع Sweep به نواحی داخل سایر دایره‌ها در مدلهای ترک کانتوری ..... ۸۵
شکل۳-۲۰- اختصاص المانهای مستطیلی از نوع Free و بصورت Medial axis به سایر نواحی تیر در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۶
شکل۳-۲۱- مش‌بندی کل تیر در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۶
شکل۳-۲۲- اختصاص المانهای درجه دو و شرایط کرنش مسطحه به تیر در مدلهای بر مبنای ترک کانتوری ..... ۸۷
شکل۳-۲۳- اختصاص المانهای مستطیلی از نوع Free و بصورت Medial axis به کل نواحی تیر در مدلهای بر مبنای ترک ناحیه غنی‌شده ..... ۸۹
شکل۳-۲۴- مش‌بندی تیر در مدلهای بر مبنای ناحیه غنی‌شده ..... ۹۰
شکل۳-۲۵- مدلهای اثر اندازه در نرم‌افزار آباکوس ..... ۹۲
شکل۴-۱- توزیع تنش در تیرهای مدلسازی شده بر مبنای ترک کانتوری ..... ۹۳
شکل۴-۲- شکست تیرهای مدلسازی شده بر مبنای ترک غنی‌شده ..... ۹۴
شکل۴-۳- منحنی بار- تغییرمکان تجربی نمونه‌ی S8 (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۹۵
شکل۴-۴- منحنی بار- تغییرمکان تجربی نمونه‌ی S15 (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۹۵
شکل۴-۵- منحنی بار- تغییرمکان تجربی نمونه‌ی P2 (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۹۶
شکل۴-۶- منحنی بار- تغییرمکان تجربی نمونه‌ی P8 (انتظاری، ۱۳۹۱) ..... ۹۶
شکل۴-۷- منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ی S8 بدست آمده از آباکوس ..... ۹۷
شکل۴-۸- منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ی S15 بدست آمده از آباکوس ..... ۹۷
شکل۴-۹- منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ی P2 بدست آمده از آباکوس ..... ۹۸
شکل۴-۱۰- منحنی بار- تغییرمکان نمونه‌ی P8 بدست آمده از آباکوس ..... ۹۸

شکل۴-۱۱- منحنی بار- تغییرمکان نرم افزاری و تجربی نمونه S8 ۹۹
شکل۴-۱۲- منحنی بار- تغییرمکان نرم افزاری و تجربی نمونه S15 ۹۹
شکل۴-۱۳- منحنی بار- تغییرمکان نرم افزاری و تجربی نمونه P2 ۱۰۰
شکل۴-۱۴- منحنی بار- تغییرمکان نرم افزاری و تجربی نمونه P8 ۱۰۰
شکل۴-۱۵- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک تجربی نمونه‌ی S8 (انتظاری، ۱۳۹۱) ۱۰۱
شکل۴-۱۶- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک تجربی نمونه‌ی S15 (انتظاری، ۱۳۹۱) ۱۰۱
شکل۴-۱۷- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک تجربی نمونه‌ی P2 (انتظاری، ۱۳۹۱) ۱۰۲
شکل۴-۱۸- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک تجربی نمونه‌ی P8 (انتظاری، ۱۳۹۱) ۱۰۲
شکل۴-۱۹- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک نمونه‌ی S8 بدست آمده از آباکوس ۱۰۳
شکل۴-۲۰- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک نمونه‌ی S15 بدست آمده از آباکوس ۱۰۳
شکل۴-۲۱- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک نمونه‌ی P2 بدست آمده از آباکوس ۱۰۴
شکل۴-۲۲- منحنی بار- بازشدگی دهانه‌ی ترک نمونه‌ی P8 بدست آمده از آباکوس ۱۰۴
شکل۴-۲۳- منحنی بار- بازشدگی دهانه ترک نرم افزاری و تجربی نمونه S8 ۱۰۵
شکل۴-۲۴- منحنی بار- بازشدگی دهانه ترک نرم افزاری و تجربی نمونه S15 ۱۰۵
شکل۴-۲۵- منحنی بار- بازشدگی دهانه ترک نرم افزاری و تجربی نمونه P2 ۱۰۶
شکل۴-۲۶- منحنی بار- بازشدگی دهانه ترک نرم افزاری و تجربی نمونه P8 ۱۰۶
شکل ۴-۲۷- مقایسه انرژی شکست(در واحد سطح ترک) نرم‌افزاری با مقادیر تجربی متناظر در روش RILEM ۱۰۸
شکل ۴-۲۸- مقایسه انرژی شکست(در واحد سطح ترک) نرم‌افزاری با مقادیر تجربی متناظر در روش JCI ۱۰۹
شکل ۴-۲۹- مقایسه‌ی چقرمگی شکست غیرمستقیم با مقادیر تجربی متناظر در روش RILEM ۱۱۱
شکل ۴-۳۰- مقایسه‌ی چقرمگی شکست غیرمستقیم با مقادیر تجربی متناظر در روش JCI ۱۱۱
شکل ۴-۳۱- چقرمگی شکست نمونه S8 در مدلسازی بر مبنای ترک کانتوری ۱۱۲
شکل ۴-۳۲- مقایسه‌ی چقرمگی شکست مدلهای بر اساس ترک کانتوری با مقادیر تجربی متناظر ۱۱۳
شکل۴-۳۳- مقایسه‌ی چقرمگی شکست از روی منحنی‌های (P-δ) و (P- CMOD) مدلهای بر اساس ترک غنی‌شده با مقادیر تجربی متناظر ۱۱۵

شکل۴-۳۴- نسبت مساحت زیر منحنی‌های $(P-\delta)$ و $(P-CMOD)$ عددی نرم‌افزاری به تجربی ..... ۱۱۶
شکل۴-۳۵- نسبت انرژی شکست (در واحد سطح ترک) عددی نرم‌افزاری به تجربی ..... ۱۱۷
شکل۴-۳۶- نسبت چقرمگی شکست غیرمستقیم عددی نرم‌افزاری به تجربی ..... ۱۱۷
شکل۴-۳۷- نسبت چقرمگی شکست روش عددی ترک کانتوری و روش ترک غنی‌شده به تجربی ..... ۱۱۸
شکل۴-۳۸- نمودار چقرمگی شکست در مقابل اندازه تیر ..... ۱۲۰

# چکیده

روشهای آیین‌نامه‌ای در مورد بحث ترک، فقط تا لحظه‌ی ایجاد آن محدود گشته‌اند و برای بیان معیاری برای رشد و گسترش ترک عاجز هستند . روش مکانیک شکست رویکردی است که به بررسی شکست و انهدام سازه‌ها در اثر رشد و گسترش ترکهای موجود در آن می‌پردازد، زیرا برای بیان واقع بینانه‌ی رشد ترک، بایستی از معیار انرژی که زیرشاخه‌ای از علم مکانیک شکست است استفاده نمود .

در این تحقیق پارامترهای مکانیک شکست (اعم از انرژی شکست و چقرمگی شکست یا طاقت مصالح) نمونه‌های تیر بتن سبک ساخته شده از سنگدانه‌های اسکوریا و پومیس با نرم‌افزار تخصصی آباکوس بدست آمده و با نتایج تجربی همان نمونه‌ها که توسط کارهای تجربی انتظاری بدست آمده بودند، مورد مقایسه قرار گرفته است . در ادامه اثر اندازه روی چقرمگی شکست با مدلسازی سه تیر دیگر با ابعاد متفاوت برای هریک از نمونه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است .

مدلسازی آزمایش خمش تیر سه‌نقطه‌ای برای هریک از نمونه‌ها با هردو روش ترک بر مبنای انتگرال کانتوری و ترک بر مبنای ناحیه غنی‌شده، صورت گرفته است . در روش ترک کانتوری، چقرمگی شکست نمونه‌ها بصورت مستقیم توسط خود نرم‌افزار محاسبه شده ولی در روش ترک غنی‌شده، منحنی بار- تغییرمکان و بار- بازشدگی دهانه ترک، برای هر نمونه رسم گردیده و از روی مساحت زیر این نمودارها، چقرمگی شکست و انرژی شکست برای آنها بدست آمده است . تمامی مدلهایی که به منظور بررسی اثر اندازه در آباکوس ایجاد شده است دقیقا مشابه مدلهای بر مبنای ترک کانتوری پیشین است و فقط هندسه آنها تغییر یافته است .

نتایج ونمودارهای حاصله از نرم‌افزار، انطباق خوبی با نتایج تجربی دارند و لذا پارامترهای مکانیک شکست بدست آمده از نرم‌افزار آباکوس، دارای صحت می‌باشند و بکارگیری روشهای این تحقیق برای سایر مصالح مشابه نیز می‌تواند قابل اعتماد باشد .



کلمات کلیدی : ترک کانتوری، ترک غنی شده، انرژی شکست، چقرمگی شکست، اسکوریا، پومیس، اثر اندازه

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ پیشگفتار

بدون تردید، ماندگارترین نوع مصالح ساختمانی که از تخت جمشید ایران تا اهرام مصر سالیان سال پایدار مانده سنگ است . اما سنگ به صورت اولیه با توجه به شکل‌پذیری کم و حمل و نقل دشوار، نمی‌تواند به عنوان مصالح اصلی در ساختمانهای امروزی کاربرد داشته باشد و این امر باعث شد نوعی سنگ مصنوعی توسط بشر خلق گردد که علاوه بر داشتن خواص سنگ، مانند ماندگاری بالا و سازگاری با محیط اطراف، دارای قابلیتهایی مانند شکل‌پذیری مناسب وحمل آسان نیز باشد . امروزه این نوع مصالح را به نام بتن می‌شناسیم .

یکی از روشهای ساختمان‌سازی که امروزه در جهان به سرعت در حال توسعه است، ساختمانهای بتنی است . ساختمانهای بتنی نسبت به ساختمانهای فولادی، دارای مزایایی از قبیل مقاومت بیشتر در مقابل آتش‌سوزی و عوامل جوی(خورندگی)، آسان بودن امکان تهیه بتن به علت فراوانی مواد تشکیل دهنده‌ی آن و عایق بودن در مقابل حرارت و صوت می‌باشند . یکی از معایب مهم ساختمانهای بتنی، وزن بسیار زیاد ساختمان می‌باشد که با میزان تخریب ساختمان در اثر زلزله نسبت مستقیم دارد .

در دنیای پیشرفته‌ی امروزی و با توجه به پیشرفتهای صورت گرفته در زمینه‌های مختلف علمی، صنعت بتن نیزدچار تحول گردیده، تولید بتن سبک نیز حاصل همین پیشرفتها می‌باشد؛ بتنی

که علاوه بر کاهش بار مرده‌ی ساختمان از نیروی وارد به سازه، در اثر شتاب زلزله می‌کاهد و در صورت تخریب، وزن آوار حاصل نیز کاهش می‌یابد که امروزه آن را بتن قرن می‌نامند .

## ۱-۲ مزایای کاربرد بتن سبک

۱) با کاهش بار وارد بر روی فونداسیون، موجب کوچکتر شدن ابعاد آن، کمتر شدن تعداد شمع‌ها و کاهش مقدار آرماتورها و به طبع آن اجرای سریع و آسانتر فونداسیون می‌گردد .
۲) کاهش بار مرده سبب کوچک تر شدن اعضا نگهدار می‌شود .
۳) کاهش بار مرده بصورت مستقیم باعث کاهش نیروهای لرزه‌ای وارد بر سازه می‌گردد .
۴) در گسترش پلها می‌توان با استفاده از مواد سبک مانند بتن سبک عرشه‌ی پل را جهت تحمل ترافیک بیشتر بزرگتر نمود، بدون اینکه تغییری در سازه و یا فونداسیون پل ایجاد شود .
۵) با توجه به مقاومت مطلوب بتن سبکدانه در برابر آتش‌سوزی، می‌توان از حداقل توصیه شده برای ضخامت بتن در کفها کاست (بیان شده در ACI-216) .
۶) حمل‌ونقل قطعات پیش‌ساخته با بتن سبک بسیار راحت‌تر بوده و هزینه کمتری در بردارد.

## ۱-۳ چگونگی تولید بتن سبک

بتن دارای دو جز اصلی می باشد: ۱- خمیرسیمان ۲- سنگدانه

سبک‌سازی می‌تواند در هر دو جز صورت پذیرد . سبک‌سازی هر قسمت دارای ویژگیهای خاصی است و با استفاده از روشهای مختلفی صورت می‌گیرد .

اگر سبک‌سازی در خمیر سیمان صورت بپذیرد، با توجه به تخلخل بالای خمیر سیمان و مقاومت پایین آن، این نوع از بتن کمتر به عنوان سازه‌ای کاربرد خواهد داشت و این روش بیشتر در تولید مصالحی بکار می‌روند که نقش باربری کمی دارند (مثل دیوارهای جداکننده).