

# نگرشی جامع بر مطالعات انجام شده در مورد بتن سبک کفی در ایران و جهان

## چکیده

اگرچه در ابتدا بتن سبک کفی<sup>۱</sup> بعنوان بتنی برای ایزولاسیون و همچنین درزبندی و شیب بندی در ساختمان سازی مطرح گردید اما با توجه به خواصی از قبیل وزن پائین، مصرف کم مصالح و قابلیت بالای مصرف ضایعات صنعتی از قبیل خاکستر بادی<sup>۲</sup> بتازگی جهت کاربردهای سازه ای و نیمه سازه ای نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی و جمع بندی مطالعات انجام یافته در مورد این بتن در زمینه مواد تشکیل دهنده آن شامل عوامل کف ساز، سیمان و فیلر های مصرفی و همچنین طرح اختلاط، روش های تولید و خواص بتن تازه و سخت شده آن پرداخته خواهد شد. لازم است مطالعات بیشتری بر روی مواردی چون عوامل کف ساز و سیستم های آن، سازگاری بین کف و افزودنی های متعارف در بتن های معمولی، مصالح سبکدانه و الیاف تقویتی و همچنین دوام بتن کفی و عوامل موثر بر تولید آن مانند نحوه اختلاط، حمل و پمپاژ صورت گیرد.

## ۱. مقدمه

در حالت کلی می توان انواع بتن سبک را به دو نوع بتن سبکدانه<sup>۳</sup> و بتن متخلخل<sup>۴</sup> تقسیم بندی نمود. بتن سبکدانه با جایگزینی مواد سبک طبیعی و یا صنعتی از قبیل پوکه های معدنی (پامیس)، لیکا، پرلیت، ورمیکولیت، پلی استایرن تولید می شوند. بتن سبک سلولی با ایجاد تخلخل (حباب های گاز) در خمیر سیمان بدست خواهد آمد. به این منظور از دو روش استفاده می شود. در یک روش تولید حباب توسط عوامل شیمیایی و بر مبنای واکنش های شیمیایی مانند واکنش پودر آلومینیم با آهک صورت می گیرد. این نوع از بتن های سبک را بتن سبک گازی گویند. در نوع دوم حباب های گازی تحت

<sup>1</sup> Foam Concrete

<sup>2</sup> Fly Ash

<sup>3</sup> Lightweight Aggregate Concrete

<sup>4</sup> Cellular Lightweight Concrete

عنوان کف بصورت مکانیکی و در تجهیزاتی بنان فوم ژنراتور (کف ساز) تولید و سپس به دوغاب سیمان و مصالح در میکسر اضافه می شود. ممکن است تولید کف همزمان در میکسر نیز انجام پذیرد. این نوع بتن را بتن کفی می نامند.

بتن کفی بتن سبکی است که در آن سلول های هوا حاصل از دستگاه کف ساز با سیمان و مصالح مناسب توسط میکسر ویژه مخلوط گردیده است. این بتن روانی بالا، وزن پائین، حداقل مصرف مصالح و خواص عایق حرارتی عالی را دارد. با کنترل مناسب مقدار کف ورودی به میکسر می توان بتن سبک کفی را در محدوده وسیعی از چگالی از  $400$  تا  $1600 \text{ kg/m}^3$  را بعنوان پرکننده و عایق، بلوک های جدا کننده و کاربرد های نیمه سازه ای یا سازه ای تولید نمود. اگرچه این بتن برای اولین بار در سال ۱۹۲۳ به ثبت رسیده است اما کاربرد های ساختمانی آن بعنوان اجزاء غیر سازه ای و نیمه سازه ای در سال های اخیر گسترش یافته است. اولین نگرش جامع بر مطالعات و نتایج مربوط به بتن سلولی در سال ۱۹۵۴ توسط [2,1] Short & Kinniburgh [4] با بیان خلاصه ای از ترکیب و خواص و کاربرد بتن های سبک سلولی بدون توجه به روش تولید آنها ارائه گردیده است. اخیراً در سال ۲۰۰۵ Jones & McCarthy [5] به جمع بندی تاریخیچه ای از کاربرد بتن کفی، مواد تشکیل دهنده آن، خواص و کاربرد های ساختمانی آن در بعضی از پروژه های دنیا پرداخته اند. در این بررسی خواص اساسی این بتن از قبیل مقاومت به شعله، هدایت حرارتی و خواص صوتی آن مورد توجه قرار گرفته است اما به خواص بتن تازه، دوام و مکانیزم ایجاد سلول های هوا چندان توجهی نشده است.

تولید بتن کفی با کیفیت مطلوب به عوامل متعددی از قبیل ماده کف کننده مناسب، روش تولید کف و توزیع مناسب آن در مخلوط، مصالح مرغوب، طراحی میکسر، رعایت اصول تولید و عملکرد مناسب با بتن تازه و سخت شده بستگی دارد. بر اساس مطالب فوق الذکر این مقاله به نگرشی جامع بر مطالعات انجام یافته در زمینه بتن کفی شامل مواد متشکله، نسبت های اختلاط، تولید و خواص بتن تازه و سخت شده خواهد پرداخت.

## ۲. مواد متشکله

### ۲.۱. مواد تشکیل دهنده اصلی

علاوه بر سیمان پرتلند معمولی سیمان های پرتلند با سرعت گیرش بالا [6,7] از قبیل سیمان های پرآلومین و کلسیم سولفوآلومینات [8] در تولید بتن کفی برای کاهش زمان گیرش و ارتقاء مقاومت ابتدائی بکار می روند. خاکستر بادی در محدوده ۳۰ تا ۷۰ درصد [5,6,9-12] و سرباره کوره بلند بصورت آسیاب شده در محدوده ۱۰ تا ۵۰ درصد [13,14] بعنوان جایگزین بخشی از سیمان جهت کاهش هزینه ها و افزایش کیفیت بتن و همچنین کاهش گرمای هیدراتاسیون و افزایش مقاومت دراز مدت بکار می روند. برای افزایش مقاومت می توان تا ۱۰ درصد وزن سیمان از دوده سیلیسی یا میکرو سیلیس<sup>۱</sup> [15-17] استفاده نمود. مواد ریزدانه دیگر از قبیل خاکستر بادی [18-20]، آهک [7]، گچ و بتن خرد شده [21]، خاکستر کوره های زباله سوز، شیشه های بازیافتی، ماسه های بازیافتی ریخته گری و معادن سنگ [22]، ضایعات پلی استایرن [23,24] جهت کاهش چگالی و / یا مصرف ضایعات می توانند بکار روند. بتن های با چگالی  $1200 - 800 \text{ kg/m}^3$  می توانند با استفاده از مصالح درشت دانه سبک مانند پامیس تولید شوند.

آب مورد نیاز در طرح اختلاط به ترکیب و مصالح بکار رفته در تولید بتن بستگی دارد [26]. در مقادیر پائین آب، بتن حاصله سفت و این حالت منجر به شکستن و از بین رفتن حباب های کف می گردد در حالیکه بتن با آب بالا قادر به نگهداری حباب ها در خود نبوده و حباب ها از آن بصورت شناوری جدا می شوند [20]. مقدار نسبت آب به سیمان در بتن کفی در محدوده ۰/۴ تا ۱/۲۵ متغیر است [15,27]. از مواد فوق روان کننده نیز ممکن است در گاهی موارد در بتن کفی استفاده شود [28] که می تواند اثر مخربی بر پایداری کف [11] داشته باشد و لازم است در مصرف آنها دقت کافی بعمل آید.

<sup>1</sup> Silica Fume

گزارشات نشان می دهد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میل متر به مقدار ۱ تا ۳ کیلو گرم در هر متر مکعب در بتن کفی باعث ارتقای خواص مکانیکی بویژه مقاومت برشی آن در حد بتن معمولی می گردد. همچنین گزارش شده است که استفاده از الیاف باعث بهبود تردی شده است [5,29,30]. شرایط بهینه برای استحکام، انعطاف، چگالی، کارائی و همچنین قیمت می تواند با انتخاب مناسب نوع الیاف، مقدار کف و نسبت مناسب w/c بدست آید [31].

## ۲.۲. کف

توضیحات کاملی از مواد کف کننده طبیعی (پروتئینی) و صنعتی توسط Valore [1]، Taylore [32]، Perez and Cortez [33]، Laukaitis et al [34] و Park et al [35] ارائه گردیده است. اغلب مطالعات بر مبنای فوم ارائه شده توسط شرکت های Neopor [36,37]، Mearlcrete [38]، Elastizell [39,40] و Foam tech [6,41-43] بوده است. بتن کفی می تواند بر مبنای روش کف پیش ساخته<sup>۱</sup> و یا روش کف مخلوطی<sup>۲</sup> تولید شود. روش تولید بر مبنای کف پیش ساخته بصورت تولید مخلوط کامل مصالح و کف پایدار بصورت مجزا و اختلاط آنها در میکسر ویژه صورت می گیرد. در روش کف مخلوطی مواد کف کننده با مصالح مخلوط و سپس ضمن اختلاط کف تولید و باعث ایجاد ساختار سلولی در بتن حاصله می گردد [16].

کف (متشکل از حباب های هوا) می بایست بقدری پایدار باشد تا بتواند در مقابل فشار مصالح تا عملکرد سیمان و سفت شدن اولیه آن دوام آورده و ساختار سلولی حاصل از واکنش های هیدراتاسیون سیمان در جداره حباب های هوا شکل گیرد [44]. کف می تواند بصورت آبکی و یا توده ای تهیه شود. کف آبکی با پاشش محلول کف کننده بر روی یک توری ریز تولید می شود و این فرآیند منجر به تولید کف با حباب های در اندازه ۲ تا ۵ میلیمتر می گردد. این کف از پایداری نسبتاً کمی برخوردار است. کف توده ای با فشردن محلول کف ساز توسط هوای فشرده در سلول کف ساز که در آن موانع فیزیکی بشکلی مناسب و بصورت فشرده قرار گرفته است با ورود همزمان هوا به سلول تولید می شود. کف توده ای بنحو قابل ملاحظه ای پایدارتر و حباب های آن در اندازه های کمتر از ۱ میلی متر هستند که شرایط مناسب تری برای اختلاط با مصالح و تولید بتن کفی قابل پمپاژ را بدنبال دارند [45]. ویسکوزیته فاز مایع، تأثیرات سطحی مانند اثر گیبس و مارانگونی<sup>۳</sup>، فشار جدا کننده بین سطوح همجوار ناشی از جذب عناصر فعال سطحی یونی و غیر یونی و پلی مرها و غلظت مواد کف کننده از جمله عواملی هستند که بر پایداری کف تأثیر می گذارند و توسط محققین گوناگون به آنها پرداخته شده است [46-50].

## ۳. طرح اختلاط و تهیه بتن کفی

اغلب از روش سعی و خطا در تنظیم ترکیب و طرح اختلاط بتن کفی برای دستیابی به خواص مورد نظر بهره گیری می شود [51]. روشی استدلالی بر مبنای محاسبات حجم جامد برای یک نسبت اختلاط مشخص با چگالی تعریف شده توسط [38] McCormick ارائه شده است. بر اساس این روش طرح کمکی بر مبنای [52] ACI 523-1975 که ارتباط چگالی بتن تازه با مقاومت فشاری را تعیین نموده است جهت تعیین مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان بکار می رود. در [53] ASTM C 796-97 روش محاسبه مقدار حجمی کف برای تهیه دوغاب با نسبت مشخص آب به سیمان و چگالی هدف آمده است. [54] Kearsley & Mostert مجموعه ای از معادلات را بر مبنای چگالی و حجم بتن کفی برای محاسبه حجم کف و مقدار سیمان ارائه داده اند. برای یک مقاومت فشاری ۲۸ روزه معین و نسبت فیلر به سیمان و چگالی بتن تازه معلوم، میزان حجم کف، آب مورد نیاز، مقدار سیمان و درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان توسط معادلات [55] Nambiar & Ramamurthy تعیین شده است. اغلب روش های پیشنهادی در شرایطی که نسبت اختلاط مواد معلوم باشد به محاسبه

<sup>1</sup> Pre-foaming Method

<sup>2</sup> Mixed Foaming Method

<sup>3</sup> Gibbs and Marangoni Effects

مقادیر هر یک از آنها کمک می کنند. اگرچه مقاومت بتن کفی به چگالی آن بستگی دارد اما در یک چگالی مشخص می توان مقاومت را با تغییر مواد افزایش داد. همچنین در یک چگالی خاص مقدار کف مورد نیاز به مواد تشکیل دهنده بتن بستگی خواهد داشت [55]. از این رو برای یک مقاومت فشاری و چگالی مورد نظر، خط مشی طرح اختلاط می بایست قادر به تعیین مقادیر مواد باشد.

روش تولید متکی بر کف پیش ساخته برای تولید بتن کفی با توجه اینکه مواد کف کننده کمتری مورد نیاز است و ارتباط دقیق تری بین مقدار مواد کف کننده و حباب های هوای ایجاد شده در بتن وجود دارد ترجیح داده می شود [1,16]. اغلب میکسرهای متعارف در تولید بتن های معمولی شامل میکسرهای دیگی مایل (بتونیر) و ناری ساز برای تولید بتن کفی نیز مناسب هستند. اگرچه استفاده از میکسر های مخصوص که پره های آنها بصورت مارپیچ و در داخل درام یا استوانه قرار دارد بسیار ترجیح داده می شود. طراحی مناسب حلزونی در داخل این میکسر ها و سرعت دوران آن از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. نوع میکسر و روند اختلاط به اینکه بتن با روش کف پیش ساخته و یا کف مخلوطی تهیه شود بستگی خواهد داشت [26].

#### ۴. خواص بتن کفی

جدول ۱ موضوعات مطالعه شده توسط محققین گوناگون در مورد خواص بتن کفی تازه و سخت شده را نشان می دهد. خواص بتن در حالت سخت شده شامل خواص فیزیکی (جمع شدگی ناشی از خشک شدن، چگالی، سیستم تخلخل، جذب آب)، خواص مکانیکی (استحکام فشاری و کششی، مدول الاستیسیته، مدل سازی)، دوام و خواص اصلی (هدایت حرارتی، خواص صوتی و مقاومت به شعله) تعریف شده است.

##### ۴.۱. خواص بتن تازه

با توجه به اینکه بتن کفی نمی تواند تحت فشار و یا ویریه قرار گیرد لازم است قابلیت جریان<sup>۱</sup> و خود تراکمی<sup>۲</sup> بالایی داشته باشد. این دو خاصیت تحت عناوین قوام و پایداری بتن کفی بوده و با مقدار آب، مقدار کف و دیگر مصالح بکار رفته در طرح اختلاط تعیین می شوند [74].

##### ۴.۱.۱ کارائی

تعیین زمان جریان در آزمایش مخروط مارش و ارتفاع فرو ریزش در آزمایش اسلامپ می تواند برای تعیین کارائی بتن کفی بکار رود [10]. این مقادیر به رئولوژی بتن نیز بستگی داشته و مشاهده شده است که استفاده از خاکستر بادی درشت در طرح اختلاط منجر به ۲/۵ برابر شدن روانی بتن در مقایسه با استفاده از ماسه و سیمان گردیده است. این افزایش ایجاد شده در روانی بتن به تفاوت در شکل ذرات و اندازه ذرات ریز در مصالح مربوط می شود. در اثر جایگزینی وزنی ماسه با خاکستر بادی کارائی بتن به دلیل افزایش مقدار ریزدانه کاهش می یابد. لذا لازم است ضمن افزایش مقدار خاکستر بادی برای تأمین کارائی مورد نیاز نسبت آب به مواد جامد نیز افزایش یابد. از طرف دیگر گزارش شده است که وجود خاکستر بادی در طرح اختلاط باعث تأثیر بر پایداری کف شده و حجم کف بیشتری را برای رسیدن به چگالی مشخص نیاز خواهد داشت. این موضوع ناشی از بالا بودن کربن در خاکستر بادی می باشد [10]. با افزایش حجم کف در مخلوط مقدار کارائی نیز کاهش می یابد که می تواند ناشی از کاهش وزن بتن و افزایش چسبندگی حباب ها به یکدیگر ناشی از مقدار هوای بیشتر در بتن [26] و چسبندگی بین حباب های هوا و ذرات جامد در مخلوط باشد.

<sup>1</sup> Flowability

<sup>2</sup> Self-Compactibility

جدول ۱ محققین گوناگون و موضوعات مطالعاتی آنها در ارتباط با بتن سبک کفی.

خواص اصلی مورد مطالعه	دوام	خواص فیزیکی و مکانیکی					خواص بتن تازه	مصالح مصرفی	نام محقق و یا محققین و شماره ارجاع در متن
		مدل سازی	مقاومت	چگالی	تخلخل	عبور آب			
خواص حرارتی و صوتی و مقاومت به شعله							C/L/CM	Valore [1,2]	
							CM	McCormick [38]	
							C	Hoff [56]	
خواص حرارتی و کاربرد های برودتی							C	Richard [39,40]	
							CM	Prim and Wittmann [57]	
							CM	Tada and Nakano [58]	
طراحی بهینه جهت کاربرد های صوتی							C	Tada [59]	
							CM	Tam et al. [60]	
							LWA	Regan and Arasteh [25]	
خواص حرارتی							-	Karl and Worner [26]	
							CM	Hunaiti [36,37]	
							CM	Kearsley [15,29]	
هدایت حرارتی							C/CF	Kearsley and Mostert [30]	
							-	Kearsley and Booyens [61]	
							CM/ CFM	Durack and Weiqing [19]	
آنالیز حرارتی در بهینه سازی انرژی							C/CF	Kearsley and Visagie [62]	
							C/CF/L	De Ross and Morris [7]	
							-	Nehdi et al. [51]	
مقاومت به شعله در کاربرد های مواد نسوز							CM	Jones [28]	
							CM	Turner [8]	
							C/CF	Kyle [63]	
مقاومت حرارتی							-	Kearsley and Wainwright [6,41-43]	
							-	Jones and Giannakou [64,65]	
							CM	Madjoudj et al. [66]	
مقایسه ضریب هدایت حرارتی							CM	Jones et al. [18]	
							CM/CFM	Tikalsky et al. [67]	
							-	Kearsley and Mostert [68]	
مقایسه خواص صوتی							CM	Proshin et al. [69]	
							CM	Jones and McCarthy [5]	
							CG	Jones and McCarthy [9]	
مقایسه خواص صوتی							CM	Wee et al. [14]	
							CM	Laukaitis and Fiks [70]	
							CM/CFM	Nambiar and Ramamurthy [20,56,71-74]	

ان با سرباره: CG مصالغ سبک‌کننده: LWA عمل‌آوری با رطوبت: mc اتوکلاو: ac جایگزینی سیمان با خاکستر بادی: CF ملات با خاکستر بادی: CFM آهک: L سیمان: C ملات: CM

## ۲.۴. خواص فیزیکی

۲.۴.۱ جمع شدگی ناشی از خشک شدن<sup>۱</sup>

به دلیل عدم حضور سنگدانه در بتن کفی میزان جمع شدگی ناشی از خشک شدن در آن بالا و تا ۱۰ برابر بتن معمولی است [2,18]. مطالعات نشان داده است که عمل آوری در اتوکلاو با ایجاد ترکیبات مینرالوژیکی ویژه ای میزان این جمع شدگی را بشدت کاهش می دهد و به ۱۲ تا ۵۰ درصد نسبت به حالت عمل آوری مرطوب می رساند و در شرایطی که دقت زیادی برای محصول از نظر مقاومت و جمع شدگی در نظر است می بایست از آن استفاده نمود [1,75]. با کاهش چگالی مقدار جمع شدگی در بتن کفی کاهش خواهد یافت [18,58,75,76] زیرا مقدار خمیر سیمان و جمع شدگی ناشی از آن کاهش یافته است. در یک مطالعه مقایسه ای از نظر جمع شدگی بین بتن کفی با فیلر ماسه ای و خاکستر بادی، بتن با فیلر ماسه مقدار جمع شدگی کمتری را دارد زیرا ذرات ماسه قدرت بیشتری برای جلوگیری از جمع شدگی نسبت به خاکستر بادی دارند [18]. گزارش شده است که می توان از مصالح سبکدانه نیز جهت کاهش میزان جمع شدگی در بتن کفی استفاده نمود [25,77].

## ۲.۴.۲ حباب های هوا

اندازه، توزیع و ساختار تخلخل در بتن کفی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است زیرا اثر مستقیمی بر خواصی مانند مقاومت و دوام آن دارد. بطور کلی ساختار تخلخل در این بتن شامل حفرات ژلی، موئینگی و حباب های حاصل از کف و هوای گیر افتاده می باشد [78]. با توجه به اینکه بتن کفی خود جاری و خود تراکم است و حاوی مصالح درشت دانه نمی باشد لذا امکان گیر افتادن هوا در آن بسیار کم و قابل صرف نظر است. حباب های موجود در بتن کفی با پارامتر هائی از قبیل شکل، اندازه، توزیع اندازه و فاصله بین حفرات ارزیابی می شوند.

توزیع حباب های هوا در بتن کفی یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر میزان استحکام آن می باشد. بتن های کفی با توزیع یکنواخت حفرات مقاومت بالاتری را نشان می دهند. استفاده از خاکستر بادی بعنوان فیلر در ترکیب بتن کفی با ایجاد پوشش یکنواخت بر روی هر یک از حباب های هوا و جلوگیری از الحاق آنها به یکدیگر به توزیع یکنواخت آنها کمک می کند. در شرایط استفاده از مقادیر بالای کف، الحاق حباب ها به یکدیگر منجر به محدوده گسترده ای از اندازه حفرات شده و لذا مقاومت کاهش می یابد [71,78]. علاوه بر اندازه و توزیع حفرات، نسبت اندازه آنها به فضای بین حفرات نیز بر مقاومت فشاری بتن سبک کفی تأثیر خواهد گذاشت. به دلیل یکنواختی شکل هندسی حفرات که بصورت کروی هستند می توان از اثر شکل هندسی بر مقاومت صرف نظر نمود [14,62,71]. در مورد بتن گازی موضوع تا حدی تفاوت خواهد داشت و انبساط حاصل از آزاد شدن گاز در بتن باعث ایجاد حفرات بیضوی در جهت بالا آمدن بتن می گردد [79]. گزارش شده است که برای دستیابی به بیشترین نسبت مقاومت به وزن در نمونه ای از بتن کفی که در آن از پودر سرباره کوره بلند استفاده شده است حفرات با فاکتور فاصله ۰/۰۴، اندازه ۰/۱۲ میلیمتر و هوای ۰/۴۲٪ بهترین نتیجه را خواهد داد [14]. مواد فیلر ریزدانه هم به توزیع یکنواخت حفرات کمک می کنند.

میزان نسبت تخلخل های مرتبط به یکدیگر به کل تخلخل در بتن کفی در مقایسه با بتن های گازی پائین و لذا نفوذ پذیری هوا در آن کمتر است [70]. این موضوع منجر به کاهش عبور صدا و همچنین جذب آب نیز می گردد. حباب های هوای محبوس شده در بتن منجر به ایجاد مسیر زیک زاک و پر پیچ و خم برای جریان موئینگی شده و باعث میرایی انتقال جرم یا انرژی می گردد. افزایش حجم حفرات منجر به کاهش ضخامت دیواره آنها و خمیر سیمان شده و بدین ترتیب جمع شدگی کمتری بوجود خواهد آمد [58]. تخلخل های بزرگ تر را می توان به مثابه مصالح با چگالی صفر و ناحیه انتقال بین حفره و خمیر را با ناحیه انتقال و فصل مشترک سنگدانه و سیمان مقایسه نمود [80]. بنا بر این برای تولید بتن کفی با نسبت بالای مقاومت به چگالی و خواص مطلوب، شناخت سیستم تخلخل از اهمیت زیادی برخوردار است.

<sup>1</sup> Drying Shrinkage

## ۳.۲.۴ چگالی

چگالی بتن را می توان در حالت خیس (تازه) و یا سخت شده تعیین نمود. از چگالی بتن تازه برای محاسبه طرح اختلاط و کنترل بتن ریزی استفاده می شود. به دلایلی از قبیل افزایش مداوم حجم کف پس از تخلیه از لانس کف ساز و یا شکستن کف در مرحله اختلاط در میکسر در بتن کفی نمی توان از معادلات تئوری مربوط به تعیین چگالی بتن تازه استفاده نمود و در نتایج پراکندگی های زیادی بوجود خواهد آمد [25]. بسیاری از خواص بتن کفی مرتبط و یا وابسته به چگالی در حالت سخت شده آن می باشد. برای تعیین چگالی لازم است وضعیت رطوبتی بتن و میزان خشک بودن آن بخوبی تعیین شود تا نتایج خواص حاصل از گزارشات گوناگون قابل مقایسه و بررسی باشند [2]. جدول ۲ معادلات ارائه شده در مقالات گوناگون را در ارتباط با تعیین چگالی در حالت سخت شده (خشک) را بر حسب وزن و حجم مصالح و یا چگالی بتن خیس نشان می دهد.

McCormick [38] اثر انواع مصالح ریزدانه، دانه بندی، نوع مواد کف زا و نسبت ماسه به سیمان را بر روی چگالی بتن تر مطالعه نموده و گزارش داده است که چگالی تر در محدوده ۵ درصد از چگالی طراحی می تواند بر مبنای استفاده از محاسبات حجمی جامد صورت گیرد. هرچه از مصالح بیشتری در طرح اختلاط استفاده شود چگالی بالاتر خواهد بود. جایگزینی ماسه با خاکستر بادی منجر به کاهش چگالی و افزایش مقاومت خواهد شد [19]. از طرف دیگر برای دستیابی به بتن کفی با چگالی مشخص استفاده از خاکستر بادی به دلیل سبک تر بودن نسبت به ماسه منجر به کاهش مصرف کف شده و لذا مقاومت بیشتری بدست خواهد آمد [55].

جدول ۲ مدل های تجربی در تعیین چگالی بتن کفی.

توضیحات	معادله	مرجع
Wc و V بترتیب وزن سیمان و حجم کل می باشند.	$(W_c + 0.2 W_c) / V = \text{چگالی خشک}$	ASTM C 796-97 [53]
A و C بترتیب وزن سیمان و مصالح به ازای کیلوگرم در متر مکعب می باشند.	$1.2 C + A = \text{چگالی خشک}$	ACI committee 523 [52]
در محدوده چگالی خیس ۷۰۰ - ۱۵۰۰ kg/m <sup>3</sup> و مخلوطی از سیمان و خاکستر بادی در محدوده ۰/۴ F/C	$\gamma_{\text{خشک}} = 55.07 - 0.868 \gamma_{\text{تر}}$	Kearsley [29]

## ۳.۴. خواص مکانیکی

## ۳.۴.۱ مقاومت فشاری

جدول شماره ۳ خلاصه ای از نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری در مقالات گوناگون را برای بتن کفی بر اساس انواع طرح اختلاط و چگالی ارائه می دهد. با کاهش چگالی مقاومت فشاری بتن کفی بصورت نمائی کاهش می یابد [15]. بررسی ها نشان داده است که شکل و اندازه نمونه، چگونگی تشکیل حفرات، جهت بارگذاری، سن، مقدار آب، مشخصات مصالح بکار رفته و روش عمل آوری بر مقاومت فشاری بتن کفی تأثیر خواهد داشت [2]. پارامترهای دیگری مانند نسبت ماسه به سیمان، آب به سیمان، نوع و توزیع اندازه دانه های ماسه و نوع ماده کف نیز بر مقاومت بتن کفی تأثیر می گذارند [45.83]. مقاومت فشاری در بتن های کفی با چگالی خشک در محدوده ۱۰۰۰ - ۵۰۰ kg/m<sup>3</sup> با افزایش قطر حفرات کاهش می یابد. در چگالی های بالاتر از ۱۰۰۰ kg/m<sup>3</sup> حفرات تأثیر کمتری بر مقاومت فشاری دارند و ترکیب و ساختار جامدی تعیین کننده مقاومت فشاری خواهد بود [78]. گزارش شده است که بر خلاف بتن های معمولی تغییرات جزئی در نسبت آب به سیمان اثر چندانی بر مقاومت بتن کفی نخواهد داشت [11]. مشاهده شده است که در مقادیر بالای نسبت آب به سیمان (در محدوده کارائی و پایداری مورد نیاز)، با افزایش نسبت آب به سیمان بر خلاف بتن های معمولی که در آنها هوای گیر افتاده در بتن درصد کمی از حجم را تشکیل می دهد مقاومت فشاری افزایش یافته است [7,60]. نتایج تحقیقات Tam et al [60] نشان داده است که مقاومت بتن کفی عمل آوری شده در رطوبت به نسبت آب به سیمان و نسبت هوا به سیمان بستگی داشته و لازم است در شرایطی که نسبت حجمی حفرات هوا به حفرات آب نزدیک شود اثر تلفیقی در نظر گرفته شود.



بررسی ها نشان داده است که جایگزینی تا ۶۷ درصد وزنی سیمان با خاکستر بادی اثر عمده ای بر کاهش مقاومت بتن کفی ندارد [6]. نتایج نشان می دهد که مقاومت فشاری بتن کفی بیشتر تابع چگالی خشک آن می باشد و در بتن های حاوی خاکستر بادی زمان بیشتری برای رسیدن به مقاومت نهائی که بالاتر از حالت استفاده از صرفاً سیمان است مورد نیاز خواهد بود. جایگزینی سیمان با میکروسیلیس بر اساس واکنش های پوزولانی و حالت پرکنندگی باعث خواهد شد تا مقاومت بیشتری در دوره های طولانی تر بویژه در بتن های کفی با چگالی بالا بدست آید.

جدول ۳ خلاصه ای از ترکیبات مورد استفاده و چگالی و مقاومت فشاری در مقالات گوناگون.

مقاومت فشاری (Mpa) ۲۸ روزه	محدوده چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت مصالح گوناگون			ترکیب و یا عبار سیمان	محقق یا محققین
		F/C	W/C	S/C		
۱/۸ - ۱۷/۶	۸۰۰-۱۸۰۰	-	۰/۳۵ - ۰/۵۷	۰/۷۹ - ۲/۸	۳۳۵-۴۴۶	McCormick [38]
۱/۸۱ - ۱۶/۷۲	۱۳۰۰-۱۹۰۰	-	۰/۶ - ۰/۸	۱/۵۸ - ۱/۷۳	۳۹۰	Tam et al. [60]
۴ - ۱۶	۸۰۰-۱۲۰۰	-	۰/۴۵ - ۰/۶	۰/۶ LAC/C	-	Regan and Arasteh [25]
۰/۶-۱۰ (روزه ۹۱)	۲۸۰-۱۲۰۰	-	-	-	سیمان- ماسه/خاکستر بادی	Van Deijk [24]
۰/۴۸ - ۳/۱	۲۴۰-۶۴۰ (DD)	-	-	-	سیمان خالص	ACI 523.1R-1992 [81]
۰/۹ - ۱/۷۲	۴۰۰-۵۶۰ (DD)	-	-	-	سیمان- ماسه	Hunaiti [37]
۱۲/۱۱	۱۶۶۷	-	-	۳	-	Kearsley and Booyens [61]
۲/۸ - ۱۹/۹	۱۰۰۰-۱۵۰۰	-	-	-	سیمان و جایگزینی با خاکستر بادی	Durack and Weiqing [19]
۱ - ۶	۹۸۲-۱۱۸۵(DD)	-	۰/۶۱ - ۰/۸۲	۱/۲۳ - ۲/۵	۳۹۸-۲۷۰	Aldridge [82]
۱-۱۵ (روزه ۷۷)	۵۴۱-۱۰۰۳(DD)	۱/۴۸ - ۲/۵	۰/۴۸ - ۰/۷	-	۱۳۷-۳۷۰	Kearsley and Wainwright [6]
۰/۵ - ۱۰	۴۰۰-۱۶۰۰	-	-	-	سیمان- ماسه	Tikalsky et al. [67]
۲ - ۱۸	۱۰۰۰-۱۵۰۰	-	-	-	سیمان و جایگزینی با خاکستر بادی	۱۴۹-۴۲۰
-	-	-	۰/۶ - ۱/۱۷	-	۱۹۳-۵۷۷	سیمان- ماسه/خاکستر بادی
۰/۷۱ - ۲/۰۷	۴۹۰-۶۶۰	-	-	-	سیمان خالص	۵۷-۱۴۹
-	-	-	۰/۴ - ۰/۴۵	-	۱۴۹-۴۲۰	Jones and McCarthy [10]
۰/۲۳ - ۱/۱	۱۳۲۰-۱۵۰۰	-	-	-	سیمان- ماسه/خاکستر بادی	Jones and McCarthy [9]
-	-	-	۰/۵ - ۰/۵۷	-	۵۷-۱۴۹	Nambiar and Ramamurthy [55]
۱ - ۲	۱۰۰۰-۱۴۰۰	-	۰/۵	۱/۸۳ - ۳/۱۷	۳۰۰	
۳/۹ - ۷/۳	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۱/۲۲ - ۲/۱۱	۱/۱۱ - ۱/۵۶	-	-	
۱۰ - ۲۶	۱۴۰۰-۱۸۰۰	-	۰/۳	۱/۵ - ۲/۳	۵۰۰	با نسبت فیبر به سیمان در محدوده ۱ تا ۳ و جایگزینی خاکستر بادی با سیمان از ۰ تا ۱۰۰٪
۲۰ - ۴۳	۱۴۰۰-۱۸۰۰	۱/۱۵ - ۱/۷۷	۰/۶۵ - ۰/۸۳	-	۵۰۰	
۱ - ۷	۸۰۰-۱۳۵۰(DD)				سیمان- ماسه درشت	
۲ - ۱۱	۸۰۰-۱۳۵۰(DD)				سیمان- ماسه نرم	
۴ - ۱۹	۶۵۰-۱۲۰۰(DD)				سیمان- ماسه- خاکستر بادی	

S/C: نسبت ماسه به سیمان - F/C: نسبت خاکستر بادی به سیمان - W/C: نسبت آب به سیمان - LAC: مقدار سبکدانه - DD: چگالی خشک

در یک چگالی مشخص و بویژه بالا، بتن با ماسه های ریز نسبت به درشت مقاومت بیشتری از خود نشان خواهد داد. نسبت بالاتر مقاومت به چگالی ناشی از توزیع یکنواخت تر تخلخل در بتن با ماسه ریز در نقایسه با حفرات و تخلخل درشت و بی قاعده در بتن با ماسه درشت می باشد [38,20]. همین رفتار در شرایط جایگزینی ماسه با خاکستر بادی نیز مشاهده می شود [55]. در بتن های سبک کفی که تمام یا بخشی از ماسه توسط خاکستر بادی تأمین شده است نسبت مقاومت فشاری به چگالی بالاتر خواهد بود [55,19,9,5]. این پدیده در چگالی های پائین (درصد بالای حجم کف) و مخصوصاً در سنین پائین کمتر مشاهده می شود زیرا در این شرایط کف مقاومت را کنترل می کند و خواص مواد بکار رفته در طرح اختلاط اثر کمتری دارد [55]. تأثیر همزمان قابلیت بالای نگهداری آب و واکنش های پوزولانیکی خاکستر بادی باعث عملکرد خوب آن در بتن کفی می گردد [12]. در شرایط چگالی تر یکسان، بتن با مصالح رس منبسط مقاومت بالاتری نسبت به بتن حاوی ماسه خواهد

داشت. استفاده از آهک، نرمه های مواد ساختمانی و پودر شیشه های ضایعاتی بعنوان ریز دانه، بی اثر و یا اثر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد و استفاده از خرده لاستیک، ماسه ریخته گری ضایعاتی، خاک کائولن و لای سنگ شکن می تواند باعث کاهش مقاومت گردد.

استفاده از اتوکلاو جهت گیرش باعث افزایش مقاومت خواهد شد. بطور کلی گزارش ها نشان می دهد که مقاومت فشاری بتن سبک کفی عمل آوری شده در آب بیشتر از عمل آوری در هوا می باشد [83]. در شرایط عمل آوری با بخار در دمای حدود  $40^{\circ}\text{C}$  مقاومت های بالاتری در مقایسه با نمونه های عمل آوری معمولی آبی گزارش شده است [61]. در بسیاری از کاربرد ها استفاده از عمل آوری مرطوب اگرچه سرعت افزایش مقاومت کمی دارد اما اقتصادی تر و مرسوم تر است [60]. عموماً از عمل آوری اتوکلاو برای قطعات بتن سبک کفی در حالت پیش ساخته استفاده می شود.

#### ۴.۳.۲ مقاومت خمشی و فشاری

نسبت مقاومت خمشی به فشاری در بتن سبک سلولی در محدوده  $0.35 - 0.25$  می باشد [2]. مقاومت کششی شکافتی بتن سبک کفی از بتن معمولی و سبکدانه کمتر است. اگرچه بتن های کفی با ماسه نسبت به خاکستر بادی مقاومت کششی شکافتی بالاتری دارند. این موضوع ناشی از مقاومت برشی بالاتر بین ذرات ماسه و خمیر سیمان است [9]. گزارشات نشان می دهد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن باعث ارتقای مقاومت فشاری و خمشی بتن کفی شده و اثر مخربی بر رفتار بتن تازه و خودتراکمی آن ندارد [30].

#### ۴.۳.۳ مدول الاستیسیته

گزارش شده است که مدول الاستیسیته استانیکی بتن کفی در محدوده چگالی  $500$  تا  $1500 \text{ kg/m}^3$  بترتیب در حدود  $1$  تا  $8 \text{ kN/mm}^2$  است که بنحو قابل ملاحظه ای کمتر از بتن معمولی و بتن سبکدانه می باشد [9]. مقدار  $E$  در بتن های معمولی در شرایط مقاومت فشاری یکسان تا  $4$  برابر بیستر است. گزارشات نشان می دهد که مقدار مدول الاستیسیته در بتن کفی با خاکستر بادی بعنوان ریزدانه نسبت به بتن کفی با ماسه کمتر است. این مطلب ناشی از این حقیقت است که خاکستر بادی بصورت خمیری بوده و حالت سنگدانه ای ندارد در حالیکه ماسه دارای مقادیر بالائی از سنگدانه های ریز است [28]. مشاهدات نشان می دهد که استفاده از الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش  $2$  تا  $4$  برابری مقدار  $E$  می گردد [9]. در دمای پائین افزایش در مقاومت فشاری بویژه در بتن های با چگالی بالا با افزایش در سفتی همراه خواهد بود [40]. جدول ۴ چند رابطه تجربی بین مدول الاستیسیته و چگالی و یا مقاومت فشاری را نشان می دهد.

جدول ۴ روابط مربوط به مدول الاستیسیته در بتن کفی.

مشخصات و شرایط	رابطه ارائه شده	محقق یا محققین
در محدوده چگالی بین $200$ تا $800 \text{ kg/m}^3$	$E = 5.31 * W - 853$	Tada [49]
معادله Pauw	$E = 33 W^{1.5} * f_c^{1/2}$	McCormick [38]
ماسه بعنوان ریزدانه	$E = 0.42 * f_c^{1.18}$	Jones and McCarthy [9]
خاکستر بادی بعنوان ریزدانه	$E = 0.99 * f_c^{0.67}$	
W: چگالی بتن بر حسب $\text{kg/m}^3$ ، $f_c$ : مقاومت فشاری بتن بر حسب $\text{N/mm}^2$ ، E: مدول الاستیسیته بر حسب $\text{kN/mm}^2$		

## ۴.۴. مدل های ارزیابی مقاومت

بعضی از محققین روابطی را برای ارزیابی مقاومت بتن کفی ارائه داده اند. Hoff [56] مدل ساده ای را بر مبنای تلفیق تخلخل ناشی از حباب های هوا و آب تبخیری ارائه نموده است. مدل ارائه شده توسط Kearsely & Wainwright [56] بیان می دارد که مدل Hoff بخوبی می تواند در ارزیابی مقاومت فشاری بتن کفی در سنین گوناگون و چگالی های گوناگون در حضور و عدم حضور خاکستر بادی بکار رود. این مدل که بر مبنای مقدار خمیر سیمان بنا نهاده شده است نمی تواند مستقیماً برای ارزیابی مقاومت در بتن های کفی با فیلر های ماسه/خاکستر بادی استفاده شود.

Tam و همکارانش [60] مدلی را بر مبنای معادلات Feret جهت ارزیابی مقاومت بتن کفی ارائه داده اند. این معادله با استفاده از میزان پیشرفت هیدراسیون بر مبنای نسبت ژل - فضای خالی توسعه یافته است. بر اساس همین مفهوم مدل دیگری جهت بتن کفی با ماسه و خاکستر بادی توسط Durack & Weiqing [19] برای اختلاط های در محدوده چگالی پائین ارائه گردیده است. Nambiar & Ramamurthy [73] شبیه به همین معادلات را بر مبنای مدل Balshin و مفهوم نسبت ژل - فضای خالی برای محدوده ای از ترکیب و محدوده وسیعی از چگالی ارائه داده اند. این مدل تطابق خوبی با مقادیر اندازه گیری شده دارد و ترکیب مواد که بسهولت قابل اندازه گیری می باشند بعنوان ورودی های آن هستند. معادله Balshin همچنین همخوانی خوبی با رسم نتایج مقاومت فشاری بر حسب تخلخل کل برای بتن های هوادار اتوکلاو [84] و تمام سنین بتن کفی شامل خمیر سیمان با خاکستر بادی بالا جایگزین ماسه دارد [42, 73].

به دلیل شکستن کف در مرحله اختلاط و همچنین انبساط آن پس از تخلیه [25] مقدار واقعی حجم کف ممکن است تغییر نماید و لذا چگالی خشک نمی تواند معیار دقیقی برای ارزیابی ترکیب اختلاط بتن کفی باشد. از اینرو بهتر است چگالی بتن تازه بعنوان ورودی در این مدل در نظر گرفته شود. البته می توان از مدل های ارائه شده در جدول ۲ که ارتباط چگالی بتن تازه و خشک را ارائه داده اند استفاده نمود. از مدل های ارائه شده در جدول ۴ می توان برای ارزیابی مدول الاستیسیته بر حسب چگالی و یا مقاومت بهره گیری نمود.

مدل های تجربی نیز برای ارزیابی مقاومت و چگالی بتن کفی بر مبنای ترکیب مواد مصرفی در طرح اختلاط از قبیل نسبت فیلر به سیمان، درصد خاکستر بادی بعنوان فیلر و حجم کف توسعه یافته اند [55]. از این نتایج می توان بعنوان راهنما در تعیین طرح اختلاط در بتن کفی بهره برداری نمود.

## ۴.۵. دوام بتن کفی

## ۴.۵.۱. مشخصات نفوذی

جذب آب: جذب آب بتن کفی با کاهش چگالی کاهش می یابد زیرا حجم خمیر سیمان و لذا حجم تخلخل موئینگی کاهش یافته است. جذب آب بتن کفی عمدتاً تحت تأثیر فاز خمیری بوده و تخلخل به دلیل بسته بودن و عدم پیوستگی نقشی در آن ندارد [41, 20]. بیان جذب آب بصورت درصد وزنی به دلیل اختلاف زیاد در چگالی بتن های سبک گمراه کننده خواهد بود. بررسی ها نشان می دهد که نفوذ پذیری بخار آب و اکسیژن در بتن کفی با افزایش تخلخل و مقدار خاکستر بادی افزایش می یابد [61]. ضریب نفوذ در بتن سبک کفی متناسب با چگالی و تناسب معکوس با نسبت تخلخل دارد [16].

عبور آب<sup>۱</sup>: عبور آب از میان یک ماده متخلخل با فرآیند جذب و انتقال توسط پدیده موئینگی رخ می دهد که بر مبنای تئوری جریان غیر اشباع بررسی می گردد [86, 85]. بررسی ها نشان می دهد که تعیین خاصیت عبور آب در مقایسه با جذب آب به نحو بهتری می تواند خاصیت انتقال آب را تعیین نماید. خاصیت عبور آب در بتن کفی از مواد اولیه آن کمتر و با افزایش حجم کف کاهش می یابد [72, 66, 65]. همچنین این مشخصه در بتن کفی به نوع فیلر، ساختار تخلخل و مکانیزم نفوذ بستگی خواهد داشت. حضور خاکستر بادی در مقایسه با ماسه در بتن کفی باعث افزایش جزئی در قابلیت عبور آب می گردد [10].

<sup>1</sup> Sorptivity

## ۴.۵. مقاومت به عوامل فعال محیطی

بررسی های انجام شده بر روی بتن سبک کفی در چگالی های پائین مقاومت خوب در مقابل یخ زدن/ آب شدن را نشان داده است [28, 67]. مقاومت به سولفات در بتن کفی که مطالعات آن توسط Jones and McCarthy [19] در طول مدت ۱۲ ماه انجام شده است نشان می دهد که این بتن مقاومت خوبی در مقابل عوامل فعال محیطی دارد. مطالعه کربوناسیون تسریع شده در بتن کفی توسط Jones and McCarthy [9] نشان می دهد که بتن های با چگالی پائین با سرعت بیشتری کربناته می شوند. همچنین بتن های حاوی خاکستر بادی نیز سرعت کربناته بیشتری دارند. آزمایشات تسریع شده نفوذ کلر نشان می دهند که عملکرد این بتن ها شبیه به بتن معمولی توأم با افزایش مقاومت به خوردگی در چگالی های پائین تر می باشد [61]. ساختار سلولی بتن کفی و تخلخل موجود در دیواره سلول ها لزوماً باعث کاهش مقاومت این بتن در مقابل نفوذ رطوبت نسبت به بتن معمولی نمی گردد. بنظر می رسد سلول های موجود بعنوان محل های تجمع مواد مانع از سرعت بالای نفوذ می گردند.

## ۴.۶. مشخصات اصلی

## ۴.۶.۱. عایق حرارتی

بتن کفی به دلیل برخورداری از ساختار سلولی خواص عایق حرارتی بسیار عالی دلرد. بررسی ها نشان داده است که هدایت حرارتی بتن کفی در چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  به میزان یک ششم بتن معمولی است [21]. مطالعات انجام شده توسط [65] Giannakau and Jones قابلیت بتن کفی جهت استفاده بعنوان ایزولاسیون حرارتی در ساختمان را نشان می دهد. ضریب هدایت حرارتی بتن کفی در محدوده چگالی  $1600 - 600 \text{ kg/m}^3$  بترتیب  $0.17 - 0.1 \text{ W/m.K}$  است که به اندازه ۵ تا ۳۰ درصد ضریب هدایت حرارتی بتن معمولی با ضریب هدایت حرارتی حدود  $2 \text{ W/m.K}$  است [5]. بررسی ها نشان داده است که عایق بودن بتن تناسب معکوس با چگالی آن دارد [27]. کاهش چگالی بتن خشک به میزان  $100 \text{ kg/m}^3$  باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی به میزان  $0.04 \text{ W/m.K}$  می گردد [77]. تغییر نسبت مواد به کف باعث تغییر چگالی شده و اثر شدیدی بر میزان عایق بودن حرارتی خواهد داشت [24].

خاکستر بادی در بتن کفی نیز باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی خواهد شد. استفاده از ۳۰ درصد PFA<sup>۱</sup> در مقایسه با حالتی که فقط از سیمان پرتلند استفاده شود باعث کاهش ۱۲ تا ۳۸ درصدی در میزان ضریب هدایت حرارتی خواهد شد. چنین پدیده ای ناشی از شکل ذرات خاکستر بادی است که باعث افزایش مسیر جریان حرارتی می گردد [65]. نتایج تحقیقات Jones and McCarthy [11] نشان می دهد که ضریب هدایت حرارتی در بتن کفی در چگالی خشک  $\text{kg/m}^3$  ۱۲۰۰ - ۱۰۰۰ در محدوده  $0.42 - 0.23 \text{ W/m.K}$  تغییر خواهد کرد. جایگزینی ۳۰ درصد وزنی سیمان با خاکستر بادی به کاهش گسترش حرارت حاصل از هیدراتاسیون منجر می شود. استفاده از سبکدانه های با چگالی پائین اثر مفیدی بر کاهش ضریب هدایت حرارتی خواهد داشت [77]. با استفاده از ذرات پلی استایرن در ساختار بتن در چگالی خشک  $650 \text{ kg/m}^3 - 200$  ضریب هدایت حرارتی به محدوده  $0.16 - 0.06 \text{ W/m.K}$  کاهش خواهد یافت [69].

گزارشات نشان می دهد که با کاهش دما، ضریب هدایت حرارتی در بتن کفی کاهش می یابد [40]. Richard و همکارانش [39] در بررسی رفتار برودتی بتن کفی به مطالعه همزمان خواص مکانیکی و حرارتی آن پرداختند. در این مطالعه اثر درجه حرارت در محدوده ۲۲ تا ۱۹۶- درجه سانتی گراد برای چگالی در محدوده  $1440 - 640 \text{ kg/m}^3$  مورد بررسی قرار گرفته است. با کاهش دما در این محدوده کاهش ۲۶ درصدی در ضریب هدایت حرارتی مشاهده شده است. Tada [59] بر اساس نیاز عایق بودن مواد در ساختمان شرایط بهینه را در مقاله خود ارائه نموده است.

<sup>1</sup> Pulverized Fuel Ash

## ۴.۶.۲ خواص صوتی

Valore [2] بیان می‌دارد که بتن سلولی خاصیت عایق صوتی آنچنان خوبی ندارد. بتن کفی مقاومت کمتری نسبت به بتن معمولی در مقابل انتقال صوت دارد [32] زیرا مقاومت و یا اتلاف صوتی ( $TL^1$ ) حاصل ضرب فرکانس در چگالی ماده در سطح می‌باشد. Tada [59] بیان می‌دارد که TL به استحکام و مقاومت درونی دیوار بستگی دارد. قابلیت انتقال صوت در دیوار های بتن سبک سلولی در محدوده فرکانس صوتی قابل شنوایی ۲ تا ۳ برابر بتن های معمولی است. بتن های متراکم تمایل به انعکاس صوت دارند در حالیکه بتن کفی آن را جذب می‌نماید و لذا این بتن ها ظرفیت جذب صوت بالاتری دارند [32].

## ۴.۶.۳ مقاومت به آتش

انتقال حرارت در مواد متخلخل در دماهای بالا توسط مکانیزم تابش روی می‌دهد که تناسب معکوس با تعداد سطوح جامدی عمود بر مسیر انتقال حرارت دارد. از اینرو با توجه به ضریب هدایت حرارتی و نفوذ پذیری حرارتی کمتر در بتن کفی می‌توان انتظار داشت که مقاومت به آتش در این بتن ها بیشتر باشد [2]. آزمایشات انجام شده بر روی مقاومت به آتش در بتن های سبک کفی در چگالی های گوناگون نشان داده است که پایداری در مقابل آتش با کاهش چگالی بیشتر می‌شود. Jones [9] and McCarthy با بررسی مطالعات قبلی بطور خلاصه چنین نتیجه گیری کرده اند که نسبت افت خواص مقاومتی در اثر شعله در این بتن ها در مقایسه با بتن های معمولی کمتر است. بتن کفی در مقایسه با بتن با سبکدانه ورمیکولییت در چگالی های پائین رفتار بهتر و در چگالی های بالا رفتار بدتری داشته است [45]. Kearsley and Mostert [68] اثر ترکیب سیمان بر رفتار بتن کفی در دمای بالا را بررسی و چنین نتیجه گیری نموده اند که بتن کفی با مقدار نسبت  $Al_2O_3/CaO$  بالاتر از ۲ می‌تواند تا دماهای  $1450^\circ C$  را بدون آسیب دیدگی تحمل نماید.

## ۵. خلاصه

بیشتر تحقیقات بر روی بتن کفی بر روی ارزیابی خواص آن متمرکز بوده است و کمتر تحقیقی روی فوم که خواص بتن را کنترل می‌کند صورت گرفته است. پایداری کف در این نوع بتن یکی از مهمترین مواردی است که می‌تواند منجر به ایجاد ساختاری ریز و یکنواخت از سلول های خالی گردد. اگرچه روش ها و راهنمایی های متعددی برای دستیابی به یک چگالی و مقاومت فشاری خاص ارائه شده است ولی در حالت کلی استاندارد طرح اختلاط مناسبی در این مورد وجود ندارد.

میزان نسبت آب به مواد جامدی در طرح اختلاط می‌بایست بگونه ای انتخاب گردد تا روانی همراه با پایداری بوجود آید. جمع شدگی در حالت خشک در بتن کفی مانند بتن با مقدار سیمان بالا خواهد بود. اما با استفاده از عمل آوری با اتوکلاو، استفاده از سبکدانه و جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی که باعث کاهش گرمای هیدراتاسیون می‌گردد این جمع شدگی را می‌توان کاهش داد. توزیع یکنواخت اندازه حباب های هوا، شکل کروی و فاصله مناسب بین حفرات منجر به بتنی با خواص مکانیکی خوب می‌گردد. بتن کفی در یک چگالی خاص با استفاده از خاکستر بادی بعنوان فیلر دارای نسبت بالاتری از مقاومت به چگالی در مقایسه با شرایط استفاده از ماسه بوده و این اختلاف با افزایش سن نمونه بیشتر خواهد شد. در چگالی های پائین حجم کف ورودی به بتن تعیین کننده مقاومت بوده و خواص مواد مصرفی اثر چندانی ندارد. از اینرو مقاومت فشاری قبل از هر چیز وابسته به چگالی خواهد بود. بررسی های دوام نشان می‌دهد که ساختمان سلولی و تخلخل موجود اثری بر کاهش مقاومت به نفوذ یونهای فعال در مقایسه با بتن های متراکم معمولی نشده است. این پدیده ناشی از این حقیقت است که در این بتن ها نسبت حفرات مرتبط به یکدیگر در مقایسه با کل حفرات پائین است. لذا بتن کفی در مقابل یخ زدن/ آب شدن و آتش مقاومت خوبی دارد و قابلیت عبور آب، جذب آب و ضریب هدایت حرارتی کمی دارد.

ایجاد تجهیزات آسان برای تولید کف و عوامل کف ساز از اهمیت ویژه ای برای توسعه بتن کفی برخوردار است. لازم است مطالعات بیشتری راجع به سازگاری بین مواد کف ساز با افزودنی های شیمیایی بتن، استفاده از مواد سبکدانه و مواد

<sup>1</sup> Transmission Loss

تقویت کننده از قبیل الیاف جهت دستیابی به رفتار سازه ای در این بتن صورت گیرد. مطالعه سیستماتیک و منسجم برای رفع ابهامات و بررسی دوام و دیگر مشخصات امری لازم و ضروری است. مشکلات مرتبط با این بتن از مرحله تولید تا حمل و پمپاژ می بایست بخوبی بررسی شوند زیرا اثر مستقیمی بر خواص بتن تازه و خشک شده خواهند داشت.

#### منابع و مراجع:

- [1] Valore RC. Cellular concrete part 1 composition and methods of production. ACI J 1954;50:773-96.
- [2] Valore RC. Cellular concrete part 2 physical properties. ACI J 1954;50:817-36.
- [3] Rudnai G. Lightweight concretes. Budapest, Akademiado; 1963.
- [4] Short A, Kinniburgh W. Lightweight concrete. Asia Publishing House; 1963.
- [5] Jones MR, McCarthy A. Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas Telford; 2005. p. 61-88.
- [6] Kearsley EP, Wainwright PJ. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. Cem Concr Res 2001;31:105-12.
- [7] De Rose L, Morris J. The influence of mix design on the properties of microcellular concrete. In: Dhir RK, Handerson NA, editors. Specialist techniques and materials for construction. London: Thomas Telford; 1999. p. 185-97.
- [8] Turner M. Fast set foamed concrete for same day reinstatement of openings in highways. In: Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments. Loughborough University; July 2001. p. 12-8.
- [9] Jones MR, McCarthy A. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. Mag Concr Res 2005;57:21-31.
- [10] Jones MR, McCarthy A. Utilising unprocessed low-lime coal ash in foamed concrete. Fuel 2005;84:1398-409.
- [11] Jones MR, McCarthy A. Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density. Cem Concr Res 2006;36(6):1032-41.
- [12] Papayianni I, Milud IA. Production of foamed concrete with high calcium fly ash. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas Telford; 2005. p. 23-8.
- [13] Pickford C, Crompton S. Foam concrete in bridge construction. Concrete 1996:14-5.
- [14] Wee TH, Babu DS, Tamilselvan T, Lin HS. Air-void systems of foamed concrete and its effect on mechanical properties. ACI Mater J 2006;103(1): 45-52.
- [15] Kearsley EP. The use of foamed concrete for affordable development in third world countries. In: Dhir RK, McCarthy MJ, editors. Appropriate concrete technology. London: E&FN Spon; 1996. p. 233-43.
- [16] Byun KJ, Song HW, Park SS. Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent. ICPIIC-98; 1998.
- [17] Fujiwara H, Sawada E, Ishikawa Y. Manufacturing of high strength aerated concrete containing silica fume. In: Malhotra VM, editor. In: Proceedings of fifth international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolana in concrete, SP 153, V.2. Farmington Hills: American Concrete Institute; 1995. p. 779-91.
- [18] Jones MR, McCarthy MJ, McCarthy A. Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective. In: Proceedings of the 2003 international ash utilisation symposium, centre for applied energy research. University of Kentucky; 2003. p. 20-2.

- [19] Durack JM, Weiqing, L. The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production. In: Page A, Dhanasekar M, Lawrence S, editors. In: Proceedings of 5th Australian masonry conference. Australia: Gladstone, Queensland; 1998. p. 129–38.
- [20] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cem Concr Res* 2006;28:475–80.
- [21] Aldridge D, Ansell T. Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential. In: Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments. Loughborough University; 2001.
- [22] Jones MR, McCarthy A, Dhir RK. Recycled and secondary aggregate in foamed concrete. WRAP Research report, the waste and resources action programme. Banbury, Oxon OX16 0AH; 2005.
- [23] Lee YL, Hung YT. Exploitation of solid wastes with foamed concrete. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas Telford; 2005. p. 15–22.
- [24] Van Deijk S. Foam concrete. *Concrete* 1991(August):49–53.
- [25] Regan PE, Arasteh AR. Lightweight aggregate foamed concrete. *Struct Eng* 1990;68(9):167–73.
- [26] Karl S, Worner JD. Foamed concrete-mixing and workability. In: Bartos PJM, editor. Special concrete-workability and mixing. London: E&FN Spon; 1993. p. 217–24.
- [27] Shrivastava OP. Lightweight aerated concrete – a review. *Indian Concr J* 1977;51:10–23.
- [28] Jones MR. Foamed concrete for structural use. In: Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments. Loughborough University; 2001. p. 27–60.
- [29] Kearsley EP. Just foamed concrete – an overview. In: Dhir RK, Handerson NA, editors. Specialist techniques and materials for construction. London: Thomas Telford; 1999. p. 227–37.
- [30] Kearsley EP, Mostert HF. Use of foam concrete in Southern Africa. In: Proceedings from the ACI international conference on high performance concrete. SP 172-48; 1997. p. 919–34.
- [31] Yamamoto M, Honda Y, Ogawa A, Rokugo K. Fiber reinforced foamed mortar with multiple cracks in flexure. In: Fischer G, Li VC, editors. International RILEM workshop on high performance fiber reinforced cementitious composites in structural applications. Japan: RILEM Publications SARL; 1999. p. 75–82G.
- [32] Taylor WH. Concrete technology and practice. London: Angus and Robertson; 1969.
- [33] Perez LEB, Cortez LAB. Potential for the use of pyrolytic tar from baggase in industry. *Biomass Bioenergy* 1997;12(5):363–6.
- [34] Laukaitis A, Zurauskas R, Keriene J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cem Concr Comp* 2005;27:41–7. [35] Park SB, Yoon ES, Lee BI. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight composites. *Cem Concr Res* 1998;29(2):193–200.
- [36] Hunaiti YM. Composite action of foamed and lightweight aggregate concrete. *J Mater Civ Eng* 1996;8(3):111–3.
- [37] Hunaiti YM. Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete. *J Mater Civ Eng* 1997;9(2):58–61.
- [38] McCormick FC. Rational proportioning of preformed foam cellular concrete. *ACI Material Journal* 1967;64:104–9.
- [39] Richard TG, Dobogai JA, Gerhardt TD, Young WC. Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications. *IEEE Trans Magn* 1975;11(2):500–3.
- [40] Richard TG. Low temperature behaviour of cellular concrete. *ACI J* 1977;74:173–8.
-

- [41] Kearsley EP, Wainwright PJ. Porosity and permeability of foamed concrete. *Cem Concr Res* 2001;31:805–12.
- [42] Kearsley EP, Wainwright PJ. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cem Concr Res* 2002;32:233–9.
- [43] Kearsley EP, Wainwright PJ. Ash content for optimum strength of foamed concrete. *Cem Concr Res* 2002;32:241–6.
- [44] Koudriashoff IT. Manufacture of reinforced foam concrete roof slabs. *J Am Concr Inst* 1949;21(1):37–48.
- [45] Aldridge D. Introduction to foamed concrete What, Why, and How? In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. *Use of foamed concrete in construction*. London: Thomas Telford; 2005. p. 1–14.
- [46] Pugh RJ. Foaming, foam films, antifoaming and defoaming. *Adv Colloid Interface Sci* 1996;64:67–72.
- [47] Drew Myers. *Surfactant science and technology*. New York: VCH Publishers; 1998.
- [48] Hutzler S, Cox SJ, Wang G. Foam drainage in two dimensions. *Colloids Surfaces A – Physicochem Eng Aspects* 2005;263:178–83.
- [49] Jalmes AS, Peugeot ML, Ferraz H, Langevin D. Differences between protein and surfactant foams: Microscopic properties, stability and coarsening. *Colloids Surfaces A – Physicochem Eng Aspects* 2005;263:219–25.
- [50] Tan SN, Fornaseiro D, Sedev R, Ralston J. The role of surfactant structure on foam behaviour. *Colloids Surfaces A – Physicochem Eng Aspects* 2005;263:233–8.
- [51] Nehdi M, Djebbar Y, Khan A. Neural network model for preformed foam cellular concrete. *ACI Mater J* 2001;98:402–9.
- [52] ACI committee 523. Guide for cellular concretes above 50 pcf, and for aggregate concretes above 50 pcf with compressive strengths less than 2500 psi. *ACI J* 1975;72:50–66.
- [53] ASTM. Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam, ASTM C 796-97. Philadelphia; 1997.
- [54] Kearsley EP, Mostert HF. Designing mix composition of foamed concrete with high fly ash contents. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. *Use of foamed concrete in construction*. London: Thomas Telford; 2005. p. 29–36.
- [55] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology. *Cem Concr Comp* 2006;28:752–60.
- [56] Hoff GC. Porosity-strength considerations for cellular concrete. *Cem Concr Res* 1972;2:91–100.
- [57] Prim P, Wittmann FH. Structure and water absorption of aerated concrete. In: Wittmann FH, editor. *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*. Amsterdam: Elsevier; 1983. p. 43–53.
- [58] Tada S, Nakano S. Microstructural approach to properties of mist cellular concrete. In: Wittmann FH, editor. *Autoclaved aerated concrete, moisture and properties*. Amsterdam: Elsevier; 1983. p. 71–88.
- [59] Tada S. Material design of aerated concrete-an optimum performance design. *Mater Construct* 1986;19:21–6.
- [60] Tam CT, Lim TY, Lee SL. Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete. *Mag Concr Res* 1987;39:12–8.
- [61] Kearsley EP, Booyens PJ. Reinforced foamed concrete, can it be durable. *Concrete/Beton* 1998;91:5–9.
-



- [62] Kearsley EP, Visagie M. Micro-properties of foamed concrete. In: Dhir RK, Handerson NA, editors. Specialist techniques and materials for construction. London: Thomas Telford; 1999. p. 173–84.
- [63] Kyle D. Manufacture and supply of Ready mix C4 top foamed concrete. In: Proceedings of one day seminar on foamed concrete: properties, applications and latest technological developments. Loughborough University; July 2001. p. 19–26.
- [64] Jones MR, Giannakou A. Foamed concrete for energy-efficient foundations and ground slabs. *Concrete* 2002(March):14–7.
- [65] Giannakou A, Jones MR. Potentials of foamed concrete to enhance the thermal performance of low rise dwellings. In: Dhir RK, Hewelett PC, Csetenyi LJ, editors. Innovations and development in concrete materials and construction. UK: Thomas Telford; 2002. p. 533–44.
- [66] Madjoudj M, Quenendec M, Dheilily RM. Water capillary absorption of cellular clayed concrete obtained by proteinic foaming. In: Dhir RK, Hewelett PC, Csetenyi LJ, editors. Innovations and development in concrete materials and construction. UK: Thomas Telford; 2002. p. 513–21.
- [67] Tikalsky PJ, Pospisil J, MacDonald W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. *Cem Concr Res* 2004;34(5):889–93.
- [68] Kearsley EP, Mostert HF. The use of foamed concrete in refractories. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas Telford; 2005. p. 89–96.
- [69] Proshin A, Beregovoi VA, Beregovoi AM, Eremkin IA. Unautoclaved foam concrete and its constructions, adapted to the regional conditions. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas Telford; 2005. p. 113–20.
- [70] Laukaitis A, Fiks B. Acoustical properties of aerated autoclaved aerated concrete. *Appl Acoust* 2006;67:284–96.
- [71] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Air-void characterization of foam concrete. *Cem Concr Res* 2007;37:221–30.
- [72] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Sorption characteristics of foam concrete. *Cem Concr Res* 2007;37:1341–7.
- [73] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Models for strength prediction of foam concrete. *Mater Struct* 2008;41:247–54.
- [74] Nambiar EKK, Ramamurthy K. Fresh state characteristics of foam concrete. *ASCE Mater Civ Eng* 2008;20:111–17.
- [75] Schubert P. Shrinkage behaviour of aerated concrete. In: Wittmann FH, editor. Autoclaved aerated concrete. Moisture and properties. Amsterdam: Elsevier; 1983. p. 207–17.
- [76] Nmai CK, McNeal F, Martin D. New foaming agent for CLSM applications. *Concr Int* 1997(April):44–7.
- [77] Weigler H, Karl S. Structural lightweight aggregate concrete with reduced density – lightweight aggregate foamed concrete. *Int J Lightweight Concr* 1980;2:101–4.
- [78] Visagie M, Kearsley EP. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters. *Concrete/Beton* 2002;101:8–14.
- [79] Cabrillac R, Fiorio B, Beaucour A, Dumontet H, Ortola S. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concrete and of the adjustment parameters on the induced porosity. *Construct Build Mater* 2006;20:286–95.
- [80] Narayanan N, Ramamurthy K. Microstructural investigations on aerated concrete. *Cem Concr Res* 2000;30:457–64.
-

- [81] ACI 523. 1R-1992, Guide for cast-in-place low density concrete. Am Concr Inst 1992.
- [82] Aldridge D. Foamed concrete. Concrete 2000;34(4):20–2.
- [83] Hamidah MS, Azmi I, Ruslan MRA, Kartini K, Fadhil NM. Optimisation of foamed concrete mix of different sand – cement ratio and curing conditions. In: Dhir RK, Newlands, MD, McCarthy A, editors. Use of foamed concrete in construction. London: Thomas; 2005.
- [84] Watson KL. Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 2: some property/porosity relationship. Int J Lightweight Concr 1980;2(3):121–3.
- [85] Hall C. Water sorptivity of mortar and concretes: a review. Mag Concr Res 1989;41:51–61.
- [86] Wilson MA, Hoff WD, Hall C. Water movement in porous building materials-Absorption from a small cylindrical cavity. Build Environ 1991;26:143–52.
-