

مقایسه اثر خاکسترهای بادی زیست‌توده‌ای (Biomass Fly Ash) با خاکسترهای بادی زغال‌سنگی (Coal Fly Ash) بر خواص مکانیکی بتن

حسین دور محمدی¹، محمد پورجعفری²، پیام حسینی²، امیر مداری²

۱- دانشجوی دکتری سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

p.hosseini@civil.sharif.edu

خلاصه

در استاندارد ASTM C618 استفاده از خاکستر بادی زیست‌توده‌ای در بتن ممنوع شده‌است. در این مقاله به مقایسه نتایج آزمایش‌های مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های بتن دارای خاکستر بادی همسوزی‌شده، خاکستر بادی از سوختن چوب خالص و خاکستر بادی ترکیبی پرداخته می‌شود. نتایج آزمایش‌های زمان‌گیرش، مقاومت فشاری در سنین مختلف و مقاومت خمشی ۵۶ روزه، نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۵ درصد از وزن سیمان با خاکستر بادی همسوزی‌شده و خاکستر بادی ترکیبی تاثیر مخربی بر خواص مکانیکی بتن به نسبت بتن‌های با خاکستر بادی زغال‌سنگی وارد نمی‌کند.

کلمات کلیدی: خاکستر بادی زیست‌توده‌ای، خاکستر بادی زغال‌سنگی، خواص مکانیکی بتن

مقدمه

در حال حاضر در سراسر دنیا از سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. این فرایند سبب افزایش آلودگی هوا می‌شود و میلیون‌ها تن فرآورده جانبی تولید می‌کند که به خاکستر بادی موسوم هستند. خاکستر بادی نوعی پسماند غیر آلی است که از سوختن پودر زغال سنگ بدست می‌آید و پس از متراکم کردن سریع، در سیلوها و مخازن مخصوص نگهداری می‌شود. نتایج تحقیقات گسترده بر روی این نوع پسماند نشان داده‌است که این پودر توانایی بالقوه‌ای در ایجاد واکنش‌های پوزولانی دارد و با جایگزینی آن با بخشی از سیمان، می‌توان خواص مخلوط‌های بتنی را بهبود بخشید. بطور معمول می‌توان خاکستر بادی را بین ۲۰ تا ۳۵ درصد وزن سیمان در مخلوط‌های بتنی جایگزین سیمان کرد که به علت قیمت کمتر خاکستر بادی به نسبت سیمان پرتلند، این جایگزینی سبب کاهش قابل توجه هزینه ساخت بتن‌های سازه‌ای می‌شود [1]. علاوه بر کاهش هزینه ساخت، افزودن خاکستر بادی به بتن سبب بهبود عملکرد و کیفیت آن می‌شود. نتایج تست‌های گوناگون بر روی بتن‌های دارای خاکستر بادی نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی سبب کاهش میزان آب مورد نیاز، بهبود کارایی، کاهش جداسازی، خون‌ریزی و حرارت هیدراتاسیون می‌شود که این امر به بهبود خواص پلاستیک بتن می‌انجامد. بعلاوه، بکارگیری خاکستر بادی در بتن سبب افزایش مقاومت، کاهش تراوایی، کاهش خوردگی و واکنش‌های قلیایی-سیلیسی و افزایش مقاومت در برابر حمله سولفاتی می‌شود. همچنین، بتن‌هایی که در آن‌ها از خاکستر بادی بهره گرفته شده‌است، روند کندتری در کسب مقاومت به نسبت بتن‌های متداول دارند و از اینرو مقاومت نهایی آن‌ها از بتن‌های معمول بیشتر می‌باشد [1].

خاکستر بادی زیست‌توده‌ای (Biomass Fly Ash)

امروزه در سازمان‌های حفاظت از محیط زیست، تلاش‌های گسترده‌ای را در جهت جایگزینی سوخت‌های تجدیدپذیر مانند سوخت‌های زیست‌توده‌ای (Biomass)، با سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ در تجهیزات تولید جریان الکتریکی در حال انجام است [2]. استفاده از پسماندها و سوخت‌های زیست‌توده‌ای در کوره‌های تولید جریان برق، علاوه بر کاهش آلودگی هوا و حفاظت از سوخت‌های ارزشمند فسیلی، سبب تولید نوع جدیدی از خاکسترهای بادی شده‌است که از لحاظ ساختار کاملاً با خاکستر بادی زغال‌سنگی (Coal Fly Ash) متفاوت می‌باشد. این نوع فرآورده جانبی نوظهور، خاکستر بادی زیست‌توده‌ای (Biomass Fly Ash) نام دارد. در صورتی که بتوان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ثابت کرد که افزودن خاکستر بادی زیست‌توده‌ای، اثرات مخرب بر بتن وارد نمی‌کند، می‌توان از آن به عنوان منبع جدیدی برای جایگزینی سیمان در بتن بهره جست [3]. بر اساس ASTM C618 استفاده از هر گونه فرآورده جانبی در بتن، که از سوختن ماده‌ای غیر از زغال‌سنگ بدست آمده باشد، مجاز نمی‌باشد. در نتیجه، مخلوط کردن زغال‌سنگ با موادی نظیر مواد زیست‌توده‌ای در جهت کاهش انتشار گازها، سبب می‌شود که دامنه کمتری از خاکسترهای بادی تولید شده در این فرایند، مورد تایید استاندارد ذکر شده باشند. عمدتاً، خاکستر بادی تولید شده از سوختن مواد زیست‌توده‌ای دارای میزان بیشتری مواد قلیایی (سدیم و پتاسیم) و مقدار کمتری آلومینا، نسبت به خاکستر بادی زغال‌سنگی می‌باشد. همچنین سوخت‌های زیست‌توده‌ای دارای طیف

گسترده‌تری از لحاظ ساختار و میزان مواد آلی می‌باشند و از اینرو، دارای انواع متفاوت‌تری نسبت به خاکستر بادی زغال‌سنگی است. تنوع خاکستر بادی زیست‌توده‌ای بیشتر تابع تنوع منبع بکارگرفته شده در تولید آن (چوب، منبع گیاهی یا منابع دیگر) است ولی عوامل دیگری مانند شرایط آب و هوایی و جغرافیایی نیز در شکل‌گیری ساختار آن موثر می‌باشد [1].

بسیاری از انواع خاکسترهای بادی زیست‌توده‌ای، مانند خاکسترهای تولید شده از سبوس برنج، چوب، سبوس گندم و غلاف نیشکر، دارای خواص پوزولانی مشابه خاکستر بادی زغال‌سنگی هستند و می‌توانند به عنوان افزودنی معدنی در مخلوط‌های بتنی استفاده شوند و عملکرد آن‌ها را بهبود بخشند.

در صنعت پس از تولید انرژی با استفاده از نیروی آب، فرایند همسوزی زغال‌سنگ و مواد زیست‌توده‌ای، اقتصادی‌ترین و کارآمدترین راه در استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی می‌باشد. در صورتی که در فرایند همسوزی، کمتر از ۱۰ درصد مواد زیست‌توده‌ای با زغال‌سنگ مخلوط شود، خاکستر بادی تولید شده، مشخصات لازم جهت بکارگیری در مخلوط بتنی را دارا می‌باشد و می‌توان از اثر فرآورده‌های تولیدی ناشی از مواد زیست‌توده‌ای صرف نظر کرد.

تحقیقات آزمایشگاهی

در این قسمت نتایج تحقیق استفاده از انواع مختلف خاکستر بادی در خواص مکانیکی بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق از سیمان پرتلند، خاکستر بادی رده F، خاکتر بادی رده C، خاکستر بادی از همسوزی علف و زغال‌سنگ، خاکستر بادی از سوختن چوب خالص و خاکستر بادی ترکیبی (ترکیب خاکستر بادی از چوب خالص و خاکستر بادی رده F و C) استفاده شده است (جدول ۱). ترکیب مقادیر کم مواد زیست‌توده‌ای با زغال‌سنگ سبب تولید اندک فرآورده‌های جانبی این دسته از مواد در ترکیب خاکستر بادی می‌شود. همچنین تفاوت‌های عمده‌ای بین خاکسترهای بادی ترکیبی و خاکسترهای بادی همسوزی شده وجود دارد. بطور مثال، فرایند همسوزی سبب افزایش میزان سولفات‌ها شدن مواد ناشی از سوختن چوب (مانند کلسیم فلزات قلیایی) می‌شود.

جدول ۱: مشخصات مواد سیمانی

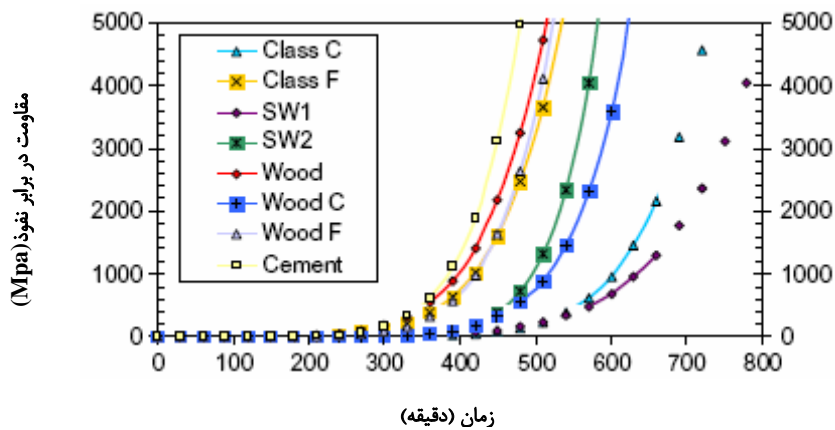
مشخصات	کد نمونه	نوع ماده
-	Class F	خاکستر بادی رده F
-	Class C	خاکستر بادی رده C
تولید شده از سوختن چوب خالص	Wood	خاکستر بادی از چوب خالص
تولید شده از همسوزی ۲۰ درصد علف و ۸۰ درصد زغال سنگ	SW1	خاکستر بادی همسوزی شده ۱
تولید شده از همسوزی ۱۰ درصد علف و ۹۰ درصد زغال سنگ	SW2	خاکستر بادی همسوزی شده ۲
-	Cement	سیمان پرتلند تیپ ۱ و ۲
ترکیب شده از ۲۰ درصد خاکستر بادی از چوب خالص و ۸۰ درصد خاکستر بادی رده C	Wood C	خاکستر بادی ترکیبی رده C
ترکیب شده از ۲۰ درصد خاکستر بادی از چوب خالص و ۸۰ درصد خاکستر بادی رده F	Wood F	خاکستر بادی ترکیبی رده F

طرح اختلاط

در این تحقیق از هر ماده در یک طرح اختلاط استفاده شده است و موارد زیر برای همه طرح‌ها یکسان می‌باشد: وزن شن، ۹۵۰ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن، نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۵، نسبت وزن خاکستر بادی به سیمان ۱/۳، مقدار هوازا ۴-۶ درصد که بر اساس ASTM C231-97 اندازه‌گیری شده است و اسلامپ ۷٫۶-۱۲٫۷ سانتی‌متر که با ASTM C143 انجام شده است. مقدار سنگدانه ریز بر اساس وزن مواد سیمانی و مقدار آب نیز بر مبنای مقدار اسلامپ انتخاب شده‌اند. روش اختلاط بر اساس ASTM C192 می‌باشد که در آن ابتدا سیمان و خاکستر بادی، با دست مخلوط می‌شوند و سپس درون مخلوط‌کن قرار می‌گیرند.

آزمایش زمان گیرش

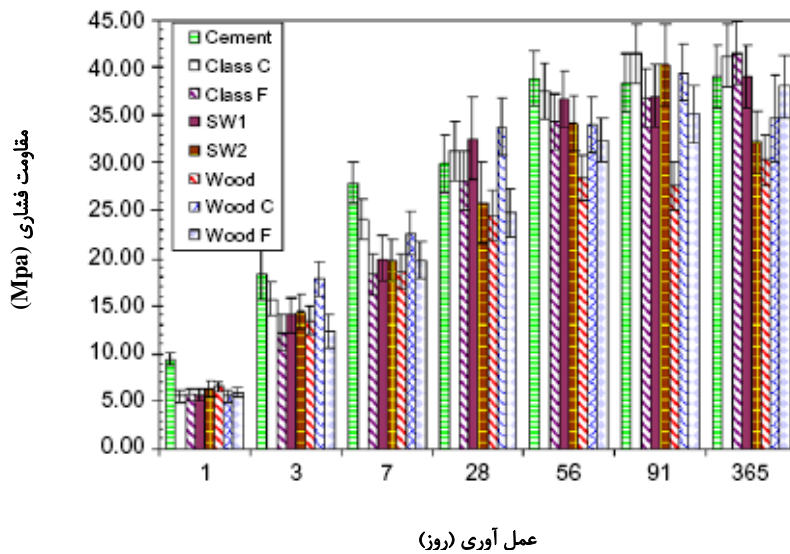
آزمایش زمان گیرش با توجه به ASTM C403 انجام شده است که در آن نمودار زمان گیرش، بر اساس تغییرات فشار نفوذ بر حسب زمان، برای نمونه‌های مختلف ترسیم می‌شود. در شکل ۱، روند گیرش برای هر یک از مخلوط‌های بتنی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هیچیک از نمونه‌ها، گیرش قابل توجهی را تا قبل از ۳۰۰ دقیقه از خود نشان نداده‌اند. در تمامی نمونه‌های دارای خاکستر بادی زمان گیرش به تعویق افتاده‌است که در آن دلایل شیمیایی و فیزیکی موثر هستند [4]. بعلاوه نسبت بالاتر جایگزینی سیمان با خاکستر بادی سبب افزایش بیشتر زمان گیرش می‌شود. نتایج زمان گیرش برای خاکسترهای بادی زیست‌توده‌ای نیز به غیر از SW2، کاملاً در محدوده زمان گیرش خاکسترهای بادی زغال‌سنگی قرار گرفته‌است که این امر نشان می‌دهد که این دسته از خاکسترها روند گیرش بتن را بطور مخرب تحت تاثیر قرار نمی‌دهند.



شکل ۱- زمان گیرش

آزمایش مقاومت فشاری

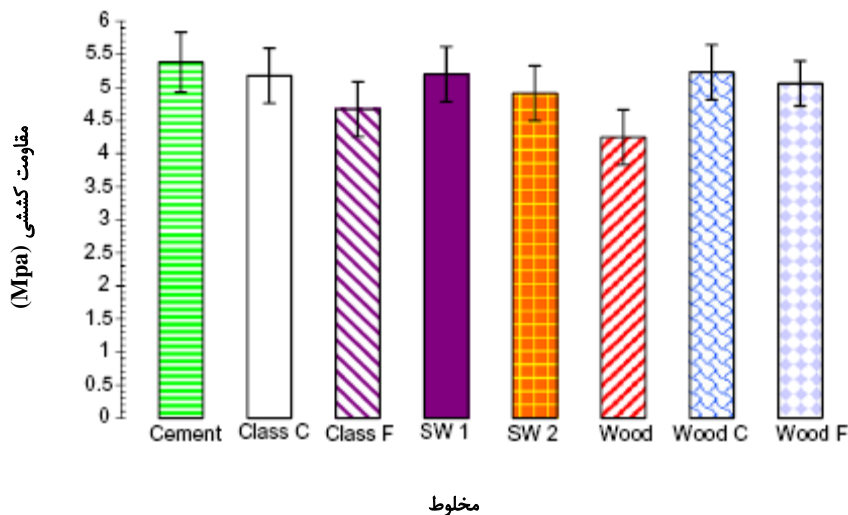
برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۳ نمونه استوانه‌ای 10×20 سانتی‌متر استفاده شده‌است. این نمونه‌ها در یک اتاق بخار، تحت عمل‌آوری قرار گرفته‌اند و در فاصله ۱، ۳، ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۳۶۵ روز پس از ساخت تحت آزمایش مقاومت فشاری بر مبنای ASTM C39 قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش مقاومت در شکل ۲ در بازه‌های با ۹۵ درصد اطمینان نشان داده شده‌اند. تا زمان ۷ روز، مخلوط سیمانی بالاترین مقاومت را از خود نشان داده‌است. در بازه ۲۸ روز تا یک سال، تمامی بتن‌های دارای خاکستر بادی غیر از بتن با خاکستر بادی چوب خالص، مقاومت قابل توجهی را نسبت به بتن سیمانی از خود نشان داده‌اند. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که خاکستر بادی زغال‌سنگی در روزهای آغازین، تاثیر کمتری در گیرش بتن دارد و بعد از گذشت مدت زمانی در حدود ۳ ماه نقش موثر خود را در گیرش بتن آغاز می‌کند [5]. در این تحقیق، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های Wood C، Wood F، SW1 و SW2 در محدوده نتایج نمونه‌های با خاکستر بادی زغال‌سنگی قرار می‌گیرند که امر نشان می‌دهد که خاکسترهای بادی زیست‌توده‌ای که در این تحقیق از سوختن چوب و علف بدست آمده‌اند دارای خواص پوزولانی می‌باشند که با نتایج تحقیقات قبلی همخوانی دارد [6]. بعلاوه نتایج نشان می‌دهد که خاکسترهای بادی زیست‌توده‌ای که ماهیت گیاهی یا چوبی دارند، اثر مخربی بر مقاومت بتن وارد نمی‌کنند [7].



شکل ۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت خمشی

برای انجام آزمایش مقاومت خمشی سه تیر به ابعاد $۵۰.۸ * ۱۵.۲ * ۱۵.۲$ سانتی‌متر بر اساس ASTM C78 ساخته شده‌اند و به مدت ۵۶ روز در اتاق بخار، در شرایط مشابه آزمون‌های مقاومت فشاری، عمل‌آوری شده‌اند. شکل ۳ نتایج آزمایش مقاومت خمشی را برای بازه اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج نمونه‌های دارای خاکستر بادی زیست‌توده‌ای (نمونه‌های ترکیبی یا نمونه‌های همسوزی‌شده) تفاوت چندانی با نمونه‌های با خاکستر بادی زغال‌سنگی ندارند [7]. عملکرد ضعیف نمونه دارای خاکستر بادی از چوب خالص، با نتایج مقاومت فشاری آن سازگار می‌باشد. یکی از علل عملکرد ضعیف این نوع از خاکستر بادی در بتن را می‌توان درشت‌تر بودن اندازه ذرات آن به نسبت سایر خاکسترها دانست که سبب گیرش ضعیف‌تر آن می‌شود [7,8].



شکل ۳- مقاومت کششی ۵۶ روزه

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در تحقیق فوق را می‌توان بطور خلاصه بصورت زیر بیان کرد:

۱- تمامی مخلوط‌های دارای خاکستر بادی شامل مخلوط‌های با خاکستر بادی زغال‌سنگی، مخلوط‌های با خاکستر بادی ترکیبی، مخلوط‌های با خاکستر بادی همسوزی‌شده و مخلوط با خاکستر بادی از چوب خالص زمان گیرش را به نسبت نمونه با سیمان پرتلند افزایش می‌دهند.

۲- نمونه با خاکستر بادی ترکیبی و خاکستر بادی همسوزی‌شده، مانند نمونه دارای خاکستر بادی زغال‌سنگی، مقاومت فشاری بتن در فاصله ۱ تا ۷ روز به نسبت بتن سیمانی کاهش می‌دهند، ولی در فاصله ۱ ماه تا ۱ سال مقاومتی برابر نمونه سیمانی کسب می‌کنند.

۳- روند کسب مقاومت فشاری بتن دارای خاکستر بادی از سوختن چوب خالص در فاصله ۱ تا ۷ روز مشابه دیگر نمونه‌های دارای خاکستر بادی می‌باشد، ولی در فاصله ۱ ماه تا ۱ سال این نمونه مقاومت کمتری به نسبت سایر نمونه‌ها کسب می‌کند.

۴- به جز نمونه دارای خاکستر بادی از چوب خالص، هیچیک از نمونه‌ها مقاومت خمشی ۵۶ روزه را به میزان زیادی، به نسبت نمونه سیمانی، تحت تاثیر قرار نمی‌دهند.

بطور کلی می‌توان گفت با استفاده از خاکسترهای بادی ترکیبی و خاکسترهای بادی تولید شده از همسوزی مواد زیست‌توده‌ای و زغال‌سنگ، بتن‌هایی می‌توان تولید کرد که دارای خواص مشابه با بتن‌های با خاکستر بادی زغال‌سنگی می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از خاکستر بادی تولید شده از سوختن چوب خالص، در بتن چندان مناسب نمی‌باشد و سبب کاهش مقاومت آن می‌شود.

منابع

- [1] Wang, S.H. and Miller, A. Liamazos, E. Fonseca, F. Baxter, L. (2008) *Biomass fly ash in concrete: Mixture proportioning and mechanical properties*. Fuel. **87**. 365-71.
- [2] Hema, J. (2001) *Static Strength and Durability Testing of Biomass Fly Ash in Concrete*. Journal of ASCE.
- [3] Pels, J.R. Nie, D.S. Kiel, JHA. (October 2005) *Utilization of ashes from biomass combustion and gasification*. 14th European Biomass Conference and Exhibition. Paris. France.
- [4] Berry, E.E. (1980) *Strength development of some blended cement mortars*. Cement Concrete Res. **10**. 1-11.
- [5] Fouad, F.H., Copham, C.A., Donavan, J.M. (1998) *Evaluation of concrete containing fly ash with high carbon content and/or small amounts of wood*. Department of Civil Engineering The university of Alabama at Birmingham.
- [6] Wesche, K. (1991) *Fly ash in concrete: properties and performance*. New York. Chapman & Hall.
- [7] Martinera, F. et al. Rudimentary, (2006) *Low tech incinerators as means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw*. Cement Concrete Res. **36**. 1056-61.
- [8] Naik, T.R. and Kraus, R.N. (2003) *A new source of pozzolanic material*. Concrete int. 25(12). 55-62.