

## کاربرد لجن خشک تصفیه‌خانه فاضلاب به‌عنوان مصالح سنگی در تولید بتن

امیر جمشیدی<sup>۱</sup>، ناصر مهرداد<sup>۲</sup>، مسعود جمشیدی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران Amirjamshidi2007@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران Mehrdadi1@yahoo.com

۳- استادیار دانشکده مهندسی شیمی، گروه پلیمر، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲۴

### چکیده

تحقیق حاضر با هدف حذف لجن انباشت شده در محوطه تصفیه‌خانه فاضلاب شهر صنعتی البرز از طریق کاربرد آن در مصالح بتنی صورت گرفته است. بر این اساس، ابتدا لجن خشک مصرفی با کمک روشهای XRD و XRF به ترتیب از نظر فازهای کریستالی موجود و ترکیب شیمیایی تجزیه و تحلیل شد. نتایج این تجزیه و تحلیل‌ها حاکی از وجود بیش از ۵۰ درصد کریستالی کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) و بیش از ۲۰ درصد مواد آلی در لجن بود. وجود مواد آلی در لجن می‌تواند به‌طور بالقوه باعث افت کیفیت بتن شود. از این رو، فرایند حرارت‌دهی لجن خشک اولیه و اثر آن بر خصوصیات کریستالی مورد توجه قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل XRD لجن پخته شده، حاکی از حذف مواد آلی و تغییراتی در فازهای کریستالی موجود بود. با توجه به بروز تغییرات کریستالی در این ماده، احتمال ایجاد فعالیت پوزولانی (واکنش‌پذیری در محیط سیمان) از طریق تجزیه و تحلیل STA بررسی شد. برای بررسی اثر لجن خشک بر خصوصیات بتن، دو طرح اختلاط بر پایه نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ در نظر گرفته شد و مقادیر صفر، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از لجن خشک در آن استفاده شد. برای بررسی اثر لجن بر عملکرد بتن، آزمون مقاومت فشاری به عنوان مشخصه دوام در نظر گرفته شده و آزمون‌های عمل‌آوری شده (سه تکرار) طی ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌های ۹۰ روزه بتن حاوی ۵ درصد لجن، کاهش حدود ۴٪، نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد لجن، کاهش حدود ۸٪ و نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد لجن کاهش حدود ۲۲٪ مقاومت فشاری را نسبت به نمونه شاهد (بدون لجن) خواهد داشت.

### کلید واژه

لجن، بتن، مقاومت فشاری، فاضلاب، تجزیه و تحلیل XRD و XRF

### سر آغاز

همیشه مشکل انباشت لجن مطرح است. از این رو، دفع این مواد به لحاظ زیست محیطی و همچنین محدودیت‌های فضای نگهداری اهمیت بسیار دارد، بنابراین مدیریت صحیح لجن تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. شهر صنعتی البرز متشکل از مناطق مسکونی و صنعتی بوده و در ۱۰ کیلومتری شهر قزوین واقع شده است. در حال حاضر، شبکه جمع‌آوری فاضلاب پساب تولیدی حدود پانصد کارخانه بزرگ و کوچک (به استثنای صنایعی از قبیل تولید چرم، کشتارگاهها و ...) را به این تصفیه‌خانه وارد می‌کند. یکی از رایج‌ترین روشهای دفع لجن، دفن بهداشتی و استفاده آن به‌عنوان کود در مزارع کشاورزی است. مقادیر زیاد اکسیدهای فلزی، فلزات سنگین و مواد آلی موجود در لجن تصفیه‌خانه شهر صنعتی البرز، موجب شده که محیط زیست استان قزوین از دفن، و یا استفاده از

دفع فاضلاب تولیدی جوامع بشری و تصفیه فاضلاب تولید شده، از ضروریات لاینفک مدیریت شهری و بهداشت عمومی است. با احداث تصفیه‌خانه، عموماً مشکلات تولید و دفع لجن خشک بروز می‌کند. نظر به آن که حجم لجن خشک تولید شده در تصفیه‌خانه‌ها عموماً زیاد بوده و مصرف مشخصی نیز برای آنها تعریف نشده است، میزان مواد جامد فاضلابی تولید شده در یک واحد تصفیه‌خانه به ازای هر فرد در روز، حدود ۳۵ تا ۸۵ گرم گزارش شده است (Davis ; 1996, Foladori, 2010).

میزان تولید لجن خشک در امریکا و اروپا در روز حدود ۱۷ میلیون تن برآورد شده (Eurosta, 2005) که با توجه به منطقه جغرافیایی می‌تواند متغیر باشد (Fytili, 2008). از آنجایی که

**مواد و روشها****لجن خشک**

لجن خشک مورد مصرف در این پروژه از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر صنعتی البرز قزوین تهیه شد. مشخصات پساب ورودی به این تصفیه‌خانه در جدول شماره (۱) ارائه شده است. ترکیب شیمیایی لجن (مرطوب) تهیه شده از ماده فوق در جدول شماره (۲) ارائه شده است. میزان نرمی نمونه لجن نیز با استفاده از الک ۴۵ میکرون (مش ۳۲۵)، اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ۵۱/۵ درصد نمونه بزرگتر از ۴۵ میکرون هستند. دانسیته لجن خشک نیز به روش ارشمیدسی اندازه‌گیری شده و معادل ۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ارزیابی شد.

**جدول شماره (۱): خصوصیات لجن تصفیه‌خانه شهر صنعتی البرز**

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	دما	درجه سانتیگراد	متغیر
۲	رنگ	-	سبز تیره
۳	هیدرات الکتریکی EC	میلی موس	۱۸۰۰
۴	PH	-	۶/۶
۵	BOD	Mg/L	۱۹۵۰
۶	COD	Mg/L	۴۶۰۰
۷	TSS	Mg/L	۱۶۰۰
۸	فسفات	Mg/L	۶۰
۹	نیترات	Mg/L	۱۰
۱۰	سولفات	Mg/L	۱۸۳
۱۱	ازت	Mg/L	۴۴
۱۲	NH <sub>4</sub>	Mg/L	۲۸
۱۳	SS	Mg/L	۴۰
۱۴	دترجنت	Mg/L	۱۴/۲
۱۵	NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub>	Mg/L	۱۰
۱۶	مجموع مواد جامد محلول	Mg/L	۹۸۰

**سیمان مصرفی**

سیمان مصرفی برای ساخت بتن، سیمان پرتلند تیپ ۲ آبیک بود. مشخصات سیمان مذکور در جدول شماره (۳) ارائه شده است. مقایسه خصوصیات سیمان مصرفی با محدوده مجاز استاندارد ملی شماره ۱۳۸۹ ایران نشان می‌دهد که سیمان مصرفی دارای کیفیت مناسب بوده است.

آن به‌عنوان کود جلوگیری کند. بنابراین از زمان بهره‌برداری تاکنون، کل لجن تولید شده در تصفیه‌خانه فوق که روزانه به‌میزان حدود ۲/۵ تا ۳ تن است، بدون مصرف باقیمانده است.

از سوی دیگر بنا بر نظر بسیاری از دانشمندان، هنوز یکی از بهترین روشهای تولید ساختمان‌های پایدار استفاده از پسماندها در تولید مصالح ساختمانی است (Mehta;2001, Glavind; 2002, Sarkar; 2003, Meyer; 2009, Khatib; 2009).

در این تحقیق، کاربرد (دفع) لجن خشک تصفیه‌خانه فاضلاب شهر صنعتی البرز قزوین، به‌عنوان یکی از مواد اولیه ساخت بتن امکان‌سنجی شده است. تاکنون تحقیقات محدودی در دنیا در خصوص کاربرد لجن فاضلاب در بتن انجام شده که یکی از مهم‌ترین آنها مربوط به والز و همکاران است.

(Valls; 2000, Valls; 2001, Yague; 2004, Mun; 2007, Muller; 2006, Monzo; 2003).

در مجموعه تحقیقات صورت گرفته توسط والز و همکاران، لجن‌ها از نظر مشخصات مورد مطالعه قرار گرفته و نحوه تثبیت لجن، حذف مواد آلی و اضافه شدن آن تا ۱۰٪ وزنی به طرح اختلاط بتن مورد مطالعه قرار گرفته است (Valls; 2000, Valls; 2001, Yague; 2005, Mun; 2007). مون نیز کاربرد این لجن‌ها را به‌عنوان سبک‌دانه در بتن بررسی کرده است (Mun; 2007).

در کشورمان ایران، تاکنون کاربرد لجن خشک فاضلابی در محصولات سیمانی، بویژه به‌عنوان مصالح سنگی انجام نشده است. در تحقیق حاضر، با استفاده از مصالح بومی کشور، نوعی لجن نمونه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مصرف آن در بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

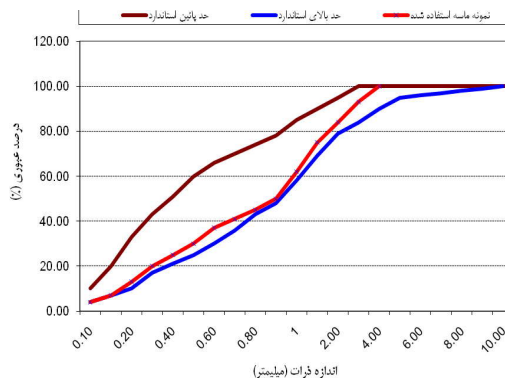
در این مطالعه، مقدار مصرف لجن در بتن با نسبت آب به سیمان‌های مختلف تا ۳۰ درصد بررسی شد. برای این منظور در ابتدا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لجن خشک مورد نظر، بررسی شد، سپس نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ و با مقادیر مختلف لجن ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد نسبت به سیمان تهیه شد.

در پایان، اثر لجن بر خصوصیات بتن تولید شده با آزمون مقاومت فشاری بررسی و با نتایج تحقیقات والز و همکاران مقایسه شد.

**جدول شماره (۲): مشخصات شیمیایی لجن مرطوب**

**تصفیه‌خانه شهر صنعتی البرز**

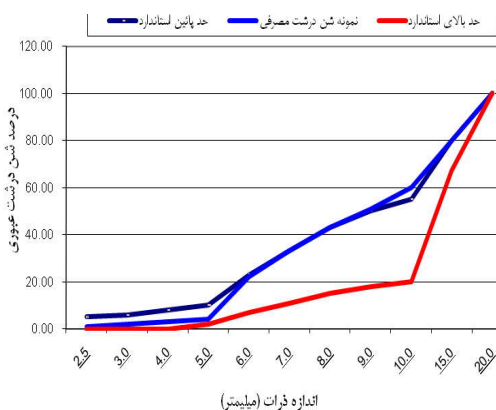
ردیف	مشخصه	واحد	مقدار
۱	PH	—	۷/۸
۲	COD	Mg/L	۲۰۰۰
۳	BOD	Mg/L	۱۲۰۰
۴	TSS	Mg/L	۷۵۰۰۰



**نمودار شماره (۱): دانه‌بندی ماسه مصرفی**



**نمودار شماره (۲): دانه‌بندی شن ریز مصرفی**



**نمودار شماره (۳): دانه‌بندی شن مصرفی**

**فوق روان کننده**

به منظور کنترل روانی بتن ساخته شده، از فوق روان کننده نوع ملکریت شرکت رزین‌سازان فارس استفاده شد.

- آب مورد استفاده در ساخت و عمل‌آوری بتن از آب شرب شهر قزوین بود که مشخصات فیزیکی- شیمیایی آن در جدول شماره (۴) ذکر شده است.

**جدول شماره (۳): خواص شیمیایی و کیفی سیمان پرتلند تپ دو**

اجزای سیمان	مقادیر	سیمان
مشخصات شیمیایی	محدوده مجاز بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹	نوع ۲ آبیک
SiO <sub>2</sub>	حداقل ۲۰	۲۰/۸۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	حداکثر ۶	۴/۹۸
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	حداکثر ۶	۳/۵۷
CaO	فاقد محدودیت	۶۲/۸۴
MgO	حداکثر ۵	۲/۷۹
SO <sub>3</sub>	حداکثر ۳	۲/۲۴
K <sub>2</sub> O	محدودیت اختیاری	۰/۶۳
Cl	فاقد محدودیت	-
افت وزنی	حداکثر ۳	۱/۸۵
باقیمانده نامحلول در اسید	حداکثر ۰/۷۵	۰/۳۷
آهک آزاد	فاقد محدودیت	۱/۲۳
C <sub>3</sub> S	فاقد محدودیت	۵۲/۵۹
C <sub>2</sub> S	فاقد محدودیت	۲۰/۰۳
C <sub>3</sub> A	حداکثر ۸	۷/۱۶
C <sub>4</sub> AF	فاقد محدودیت	۱۰/۸۷
C <sub>3</sub> S+C <sub>3</sub> A	محدودیت اختیاری	-

**سنگدانه مصرفی**

شن و ماسه مصرفی برای ساخت بتن از معدن شرکت راهسر در حوالی نظام‌آباد شهر قزوین و به فاصله حدود ۱۵ کیلومتری مرکز استان تهیه شد. نتایج دانه‌بندی این سنگدانه‌ها در شکل‌های شماره (۱ تا ۳) نمایش داده شده‌اند. نتایج بررسی‌های این سنگدانه‌ها نشان داد که میزان مدول نرمی FM=۳/۱ بود.

به منظور مصرف لجن در بتن، مقادیر مختلف ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد لجن در نظر گرفته شد که طرح مخلوط‌های در نظر گرفته شده با احتساب دو نسبت آب به سیمان، در جداول شماره (۶ و ۷) ارائه شده است.

**جدول شماره (۶): طرح اختلاط بتن حاوی لجن برای نسبت آب**

به سیمان  $W/C = ۰/۵۵$

شرح	نمونه ۵٪ حاوی لجن	نمونه ۱۰٪ حاوی لجن	نمونه ۲۰٪ حاوی لجن	نمونه ۳۰٪ حاوی لجن
سیمان (kg)	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰
شن (kg)	۸۶۱	۸۶۱	۸۶۱	۸۶۱
ماسه (kg)	۸۵۲	۸۳۴	۷۹۸	۷۶۲
آب (lit)	۱۹۸	۱۹۸	۱۹۸	۱۹۸
ملکریت (kg)	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۶
لجن (kg)	۱۸	۳۶	۷۲	۱۰۸

**جدول شماره (۷): طرح اختلاط بتن حاوی لجن برای نسبت آب**

به سیمان  $W/C = ۰/۴۵$

شرح	نمونه ۵٪ حاوی لجن	نمونه ۱۰٪ حاوی لجن	نمونه ۲۰٪ حاوی لجن	نمونه ۳۰٪ حاوی لجن
سیمان (kg)	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰
شن (kg)	۸۶۱	۸۶۱	۸۶۱	۸۶۱
ماسه (kg)	۸۵۲	۸۳۴	۷۹۸	۷۶۲
آب (lit)	۱۶۲	۱۶۲	۱۶۲	۱۶۲
ملکریت (kg)	۳/۶	۳/۶	۳/۶	۳/۶
لجن (kg)	۱۸	۳۶	۷۲	۱۰۸

**نحوه عمل آوری بتن**

بتن‌های ساخته شده پس از ساخت در درون قالب‌های فلزی ریخته شده (سه تکرار برای هر آزمونه) و به مدت ۲۴ ساعت در محیط مرطوب (زیر گونی خیس و ورقه پلی اتیلنی) نگهداری شدند. سپس از قالب خارج شده و تا عمر ۲۸ روز در حوضچه آب با دمای محیط عمل آوری شدند.

سپس از حوضچه خارج شده و مورد آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند (Yague, 2005).

**جدول شماره (۴): نتایج آزمایش‌ها فیزیکی و شیمیایی آب**

**قزوین**

ردیف	مشخصه اندازه گیری شده	واحد اندازه گیری	مقدار موجود
۱	درجه حرارت آب هنگام آزمایش	درجه سانتیگراد	۱۹/۹
۲	قابلیت هدایت الکتریکی	$\mu s.Cm^{-1}$	۵۸۸
۳	pH	—	۸/۲
۴	باقیمانده تیخیر در ۱۸۰ درجه	Mg/L	۲۹۴
۵	سختی کل	Mg/L as $CaCO_3$	۸۰
۶	کلسیم	Mg/L as $Ca^{+2}$	۱۷
۷	منیزیم	Mg/L as $Mg^{+2}$	۹
۸	سدیم	Mg/L as $Na^{+1}$	۱۰۰
۹	پتاسیم	Mg/L as $K^{+}$	۰/۹
۱۰	منگنز	Mg/L mm	<۰/۰۱
۱۱	آهن	Mg/L Fe	<۰/۰۵
۱۲	کلراید	Mg/L $Cl^{-}$	۲۱
۱۳	فلوراید	Mg/L $F^{-}$	۰/۴
۱۴	فسفات	Mg/L $PO_4^{-3}$	۰/۲۷
۱۵	سولفات	Mg/L $SO_4^{-2}$	۵۰
۱۶	آمونیاک	Mg/L $NH_3$	<۰/۰۲
۱۷	نیترات	Mg/L $NO_3^{-1}$	۱۳
۱۸	نیتريت	Mg/L $NO_2^{-1}$	۰/۰۱۳
۱۹	کربنات	Mg/L $CO^{-3}$	۰
۲۰	بی کربنات	Mg/L $HCO^{-3}$	۲۵۴/۲۴

**طرح مخلوط بتن**

به منظور تهیه بتن برای انجام آزمون‌ها، نیاز به تعیین طرح مخلوط مناسب بود که با آزمون‌های اولیه انجام شده، طرح مخلوط بتن‌های شاهد مورد نظر بر اساس آئین‌نامه آمریکا ACI-211، مطابق جدول شماره (۵) بر اساس دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ طراحی شد.

**جدول شماره (۵): طرح مخلوط بتن شاهد (بدون لجن) با**

**نسبت‌های متفاوت آب به سیمان**

ردیف	شرح	مقادیر $(Kg/m^3)$ $W/C = ۰/۵۵$	مقادیر $(Kg/m^3)$ $W/C = ۰/۴۵$
۱	شن	۸۷۰	۸۷۰
۲	ماسه	۸۷۰	۸۷۰
۳	سیمان	۳۶۰	۳۶۰
۴	آب	۱۹۸	۱۶۲
	فوق روان کننده	۳/۶	۳/۶

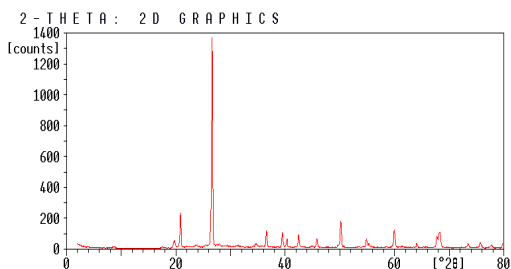
همکارانش حدود ۳۰ درصد) از مقادیر بیشتر سیلیس ( $\text{SiO}_2$ ) بهره‌مند است که به لحاظ ساخت بتن، ماده‌ای مناسب است. همچنین بیش از ۲۰ درصد لجن خشک مصرفی از مواد آلی تشکیل شده است (Mun;2007, Muller,2006). تجزیه و تحلیل کریستال‌های موجود در لجن خشک مصرفی حاکی از وجود چهار نوع فاز کریستالی غالب در لجن است که بیشترین میزان موجود مربوط به کریستال‌های کوارتز است (جدول شماره ۹). این تجزیه و تحلیل نشان داد که بیشتر سیلیس آشکار شده در تجزیه و تحلیل XRF از نوع کریستالی است، که عملاً نمی‌تواند در هیدراته شدن سیمان نقش داشته باشد و فقط به عنوان پرکننده (مصالح سنگ ریزدانه) عمل می‌کند.

**جدول شماره (۹): کریستال‌های تشخیص داده شده در**

فرمول شیمیایی	شرح	ردیف
$\text{SiO}_2$	Quartz.syn	۱
$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	Muscovite – ZM1	۲
$\text{CaCO}_3$	Calcite	۳
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomite	۴

**نتایج بررسی مشخصات لجن خشک پس از عملیات حرارتی**

با توجه به وجود بیش از ۲۰ درصد مواد آلی در لجن خشک و با در نظر گرفتن به کاهش خصوصیات مکانیکی بتن در اثر حضور مواد آلی، لجن خشک در معرض حرارت‌دهی تا ۶۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. مهم‌ترین تفاوت بصری رخ داده، تغییر رنگ فاحش لجن از سبز تیره به خاکستری روشن بود. برای مشخص شدن اثر این فرآیند بر شیمی ماده، لجن خشک پس از حرارت‌دهی مجدداً تحت تجزیه و تحلیل XRD قرار گرفت که نتایج در شکل شماره (۵) و جدول شماره (۱۰) ارایه شده است.



JAH1.SH

**نمودار شماره (۵): تجزیه و تحلیل XRD نمونه لجن خشک**

پس از عملیات حرارت‌دهی

**آزمون مقاومت فشاری**

آزمونه‌های مقاومت فشاری در ابعاد  $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$  ساخته شد و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM- C 39 مورد آزمون قرار گرفت (Valls, 2001).

**نتایج**

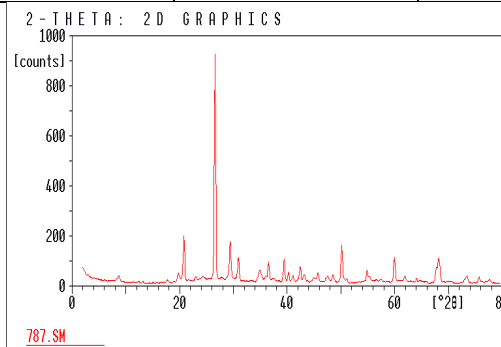
**نتایج بررسی مشخصات کریستالی و شیمیایی لجن خشک**

به منظور شناسایی ویژگی‌های ذاتی لجن خشک مورد استفاده، این ماده تحت تجزیه و تحلیل‌های XRF و XRD قرار گرفت که نتایج تجزیه و تحلیل‌ها به ترتیب در جدول شماره (۸) و شکل شماره (۴) ذکر شده است.

**جدول شماره (۸): تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی لجن خشک به**

**کمک تجزیه و تحلیل XRF**

درصد	عناصر	ردیف
۲۱/۳	L.O.I	۱
۰/۴۳۶	$\text{Na}_2\text{O}$	۲
۲/۱۹۴	$\text{MgO}$	۳
۸/۹۶۲	$\text{Al}_2\text{O}_3$	۴
۵۴/۵۴۵	$\text{SiO}_2$	۵
۱/۳۰۳	$\text{P}_2\text{O}_3$	۶
۰/۱۷۱	$\text{SO}_3$	۷
۱/۷۹	$\text{K}_2\text{O}$	۸
۷/۳۳۷	$\text{CaO}$	۹
۰/۲	$\text{TiO}_2$	۱۰
۰/۹۲۷	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	۱۱
۰/۱۴۹	Zn	۱۲
۰/۵۴۱	Br	۱۳
۰/۰۳۱	Sr	۱۴
۰/۱۱۴	Zr	۱۵



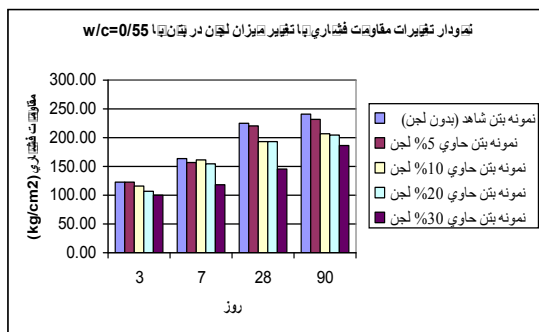
**نمودار شماره (۴): تجزیه و تحلیل XRD نمونه لجن خشک**

نتایج این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که بیش از ۵۰ درصد لجن خشک مورد استفاده از مواد سیلیسی تشکیل شده است که در مقایسه با نمونه‌های بررسی شده در تحقیقات دیگر محققان (والز و

۳۷/۸۶ درصد به دست آمده که بسیار کمتر از مقادیر معمولی برای مواد دارای فعالیت پوزولانی (بیش از ۷۰ درصد) است. از این رو لجن پخته شده نیز در بتن تنها نقش پرکنندگی خواهد داشت.

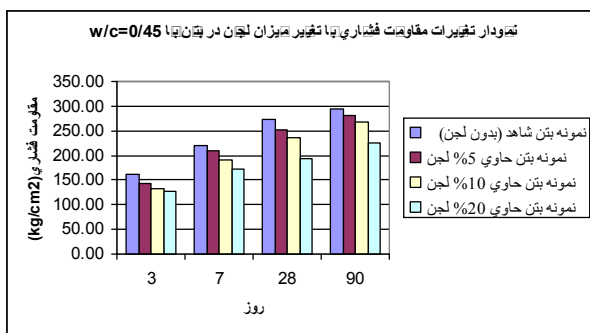
### نتایج آزمون مقاومت فشاری

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، لجن خشک در طرح اختلاطها به عنوان مصالح سنگی در نظر گرفته شده و آزمون‌های ساخته شده تحت آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند. نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ و ۰/۴۵ در شکل‌های شماره (۷ و ۸) ارایه شده است.



### نمودار شماره (۷): مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی لجن

خشک در نسبت آب به سیمان  $W/C = 0/55$



### نمودار شماره (۸): مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی لجن

خشک در نسبت آب به سیمان  $W/C = 0/45$

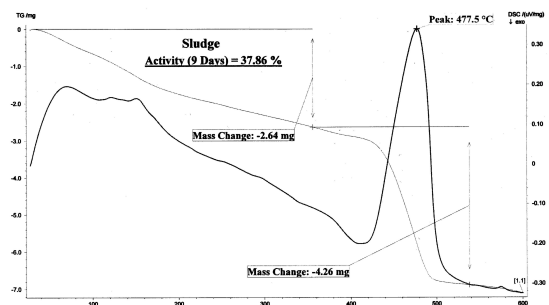
نتایج حاکی از آن است که با افزایش نسبت آب به سیمان مقاومت فشاری بتن در همه عمرهای عمل‌آوری کاهش یافته است. این مسئله بسیار بدیهی است زیرا با افزایش نسبت آب به سیمان ترک خوردگی‌های میکروسکوپی بتن افزایش یافته و مقاومت نهایی کاهش می‌یابد. همچنین در هر دو نسبت آب به سیمان، روند افزایشی مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مشاهده شد که این خصوصیت نیز با توجه به پیشرفت واکنش‌های شیمیایی

### جدول شماره (۱۰): فازهای کریستالی تشخیص داده شده در

#### لجن خشک پس از عملیات حرارتی

ردیف	شرح	فرمول شیمیایی
۱	QuarTZ.syn	SiO <sub>2</sub>
۲	Muscorite – ZM1	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>
۳	Lllite-2M2	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>

نتایج این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که عملیات حرارتی علاوه بر حذف مواد آلی، موجب تغییر ساختار کریستالی نیز می‌شود. این نتیجه، احتمال تشکیل سیلیس آمورف در لجن را که می‌تواند همچون پوزولان‌ها (مواد جایگزین سیمان که عموماً ریشه طبیعی دارند) در فرایند هیدراته‌شدن و عمل‌آوری بتن شرکت کند، تقویت کرد. برای بررسی این موضوع، لجن پخته شده تحت تجزیه و تحلیل TGA قرار گرفت تا میزان فعالیت پوزولانی آن مشخص شود. نتایج تجزیه و تحلیل در شکل شماره (۶) ذکر شده است.



### نمودار شماره (۶): تجزیه و تحلیل TGA لجن پخته شده

این تجزیه و تحلیل با استفاده از دستگاه STA-449C، از طریق میزان جذب مورد بررسی قرار گرفت. آزمون با استفاده از دستگاه STA با برنامه حرارتی مشخص به شرح زیر انجام شد:

- حداکثر دمای اعمال شده: ۶۰۰ درجه سانتیگراد
- نرخ دمای اعمال شده: ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه
- زمان نگهداری در دمای نهایی: ۲ دقیقه

اولین پیک گرمای که در دمای ۴۷۷/۵ درجه سانتیگراد مشاهده می‌شود، مربوط به Ca(OH)<sub>2</sub> است که وارد واکنش نشده و در محیط باقی مانده و به CaO و H<sub>2</sub>O تجزیه شده است. افت وزنی که از طریق پیک‌های مربوط به منحنی TG محاسبه شده (۷/۲۲ درصد)، مبین تجزیه حرارتی است. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل میزان فعالیت پوزولانی نمونه لجن از طریق محاسبه، معادل

همچنین، با افزایش میزان لجن خشک، روانی مخلوط کم شده و بنابراین درخواست آب در بتن به منظور امکان‌پذیر کردن قالب‌ریزی بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش میزان آب، استحکام بتن با توجه به پیدایش ریزترک‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین با افزایش میزان لجن، استحکام بتن کاهش خواهد یافت.

افزایش تا ۱۰ درصد لجن خشک به بتن باعث کاهش حداکثر ۸ درصدی مقاومت فشاری می‌شود که در بتن‌های معمولی همچون بتن کفی که نیاز به مقاومت‌های خیلی بالا ندارند، قابل چشم‌پوشی است. میزان کاهش مقاومت به‌دست آمده در اثر مصرف ۱۰ درصد لجن خشک تصفیه‌خانه فاضلاب شهر صنعتی البرز قزوین در مقایسه با نتایج تحقیقات مشابه انجام شده در سال ۲۰۰۴ در بارسلونای کشور اسپانیا توسط والز و همکارانش، بسیار کمتر بوده است. در تحقیقاتی که توسط والز و همکاران استفاده از ۱۰ درصد لجن خشک باعث کاهش ۴۲ درصدی در مقاومت فشاری شده بود که عملاً بتن حاصل امکان استفاده در هیچ کاربردی را ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که لجن خشک مورد بررسی برای مصرف در بتن بسیار مناسب‌تر است.

بر اساس کلیه نتیجه‌گیری‌های فوق، مصرف مقادیر کمتر از ۱۰ درصد لجن خشک با توجه به مزایای بسیار زیاد زیست محیطی و اقتصادی، و کاهش قابل اغماض مقاومت فشاری، در ساخت بتن‌های معمولی که نیاز به رده‌های مقاومتی بالا ندارند (همچون بتن بنایی و بتن کفی) توصیه می‌شود.

سیمان، با گذشت زمان، منجر به بهبود خصوصیات استحکامی می‌شود که کاملاً بدیهی به نظر می‌رسد. همچنین ورود لجن به بتن باعث درخواست آب بیشتر و افت شدید روانی (کارایی بتن) شد به‌گونه‌ای که در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ امکان ساخت آزمون به لجن ۳۰٪، به دلیل روانی بسیار کم بتن تازه فراهم نیامد. این مشکل حتی با افزودن مقادیر بیشتر فوق‌روان‌کننده نیز رفع نشد. مهم‌ترین نتیجه حاصل از آزمون مقاومت فشاری آن است که با افزایش مقدار لجن خشک در بتن، مقاومت فشاری آزمون‌ها کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش، به‌خصوص در هنگام افزایش مقدار ۲۰ درصد و بیشتر از لجن، بارز و چشمگیر است.

### بحث و نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق نتیجه‌گیری‌های زیر انجام میشود: ترکیب شیمیایی لجن فاضلابی تصفیه‌خانه شهر صنعتی البرز قزوین، با توجه به مقدار سیلیس فراوان موجود در آن سازگاری مناسبی با ساختار سیلیکاتی بتن دارد. لجن خشک پخته شده با توجه به فعالیت بسیار کم پوزولانی و عدم واکنش‌پذیری (یا واکنش‌پذیری بسیار کم) در محیط سیمان، نقش مصالح سنگی را در بتن بازی می‌کند. افزایش لجن خشک به بتن باعث کاهش مقاومت محصول می‌شود. این کاهش به دلیل کم شدن درصد سیمان (نقش چسباننده سنگدانه‌ها را به یکدیگر دارد) در طرح مخلوط رخ می‌دهد. طبیعی است که با توجه به عدم خاصیت پوزولانی لجن انتخاب شده، کاهش مقاومت فشاری با افزایش مقدار لجن استفاده شده از ۵ درصد به ۲۰ درصد، شدت گیرد.

### منابع مورد استفاده

Foladori, P., A., Gianni and G., Ziglio. 2010. Sludge reduction technologies in wastewater treatment plants, IWA Publishing, ISBN: 9781843392781

Davis, R. 1996. The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal, J CIWEM 10, 65-69.

EUROSTAT. 2005. <http://epp.eurostat.cec.eu.int>.

Fytli, D., A., Zabanitou. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol.12, 116-140.

Mehta, P.K. 2001. Reducing the environment impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. Concrete International 10, 61-66.

Meyer, C. 2009. The greening of the concrete industry, Cement and Concrete Composites 31, 601-605.

---

Glavind, M., C., Munch-Petersen .2002. Green concrete: a life cycle approach. In Sustainable Concrete Construction, Ed. Dhir, R.; Dyer, T.; Halliday, J., 771-786.

Sarkar, S., J., Roumain .2003. New cements for sustainability. Role of Cement Science in Sustainable Development, Ed. Dhir, R.; Newlands, M., Csetenyi, L., Thomas Telford, 45-57.

Khatib, J. 2009. Sustainability of building materials. Woodhead Publishing in Materials.

Valls, S., E., Vazquez .2000. Stabilization and solidification of sewage sludges with cement, Cement and Concrete Research, 30, 1671-1678.

Valls, S., E., Vazquez .2001. Accelerated carbonation of sewage sludge-cement-sand mortars and its environment impact, Cement and Concrete Research, 31, 1271-1276.

Valls, S., et al. 2004. Physical and mechanical properties of concrete with dry sludge from sewage treatment plant, Cement Concrete Research, 34, 2203-2208.

Yague, A., et al. 2005. Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants, Cement and Concrete Research, 35, 1064-1073.

Mun, K.J. 2007. Development and test of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete, Construction Building Materials, 21, 1583-1588.

Muller, U., K., Rubner . 2006. The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component, Cement and Concrete Research, 36, 1434-1443.

Monzo, J., et al. 2003. Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in mixture: the effect of SSA on the workability of cement mortars, Waste Management, 23, 373-381.