

بسم الله الرحمن الرحيم

محافظت بتن های مقاومت بالا

با استفاده از دانه های سبک

تدوین و ترجمه :

مرتضی امری نیا

www.AmeriCivil.com

مقدمه :

راه کاری فنی برای مشکلات و مسایل موجود در محافظت بتن های مقاومت بالا پیشنهاد میشود. روش جدید شامل بکار بردن مخلوطی از دانه ها می باشد که دانه های سبک را در بر می گیرد. ذرات از پیش خیس شده در پروسه سخت سازی و خشک سازی سیمان نقش منبع آب را ایفا می نمایند و اجازه میدهند تا یک هیدراسیون (Hydration) مداوم انجام گیرد که باعث محافظت ویژگیهای بتن خواهد شد.

یک راه کار اساسی برای دستیابی به ویژگی های طراحی شده بتن، جلوگیری کردن از تبخیر آب سطح و تأمین آب از سطح خارجی می باشد. اگر در مرحله ساخت ملات سیمان، آب کافی برای پیشرفت هیدراسیون وجود داشته باشد، بتن بدست آمده ویژگی های بسیار عالی را خواهد داشت. اغلب روشهای قدیمی در عمل با شکست روبرو می شوند. حتی اگر این روش ها را بطور بسیار دقیق انجام دهیم، تنها تبخیر آب کاهش می یابد ولی تأمین آب از اجزاء ساختاری عمودی سطح به عنوان یک مشکل فنی به قوت خود باقی خواهد ماند. زمانی که به محافظت اختصاص داده میشود، زمان ساخت راکدی می باشد که افزایش انرژی و هزینه را باعث می گردد. در مورد بتن های مقاومت بالا (HSC) که معمولاً در اجزاء ساختاری عمودی بکار می روند، میزان مشکلات افزایش می یابد. به دلیل نسبت بسیار پایین آب به سیمان، در اجتماع با سیمان حجم بالا و اضافه شدن گاز سیلیکا، بتن در سالهای اولیه مقاومت فشاری بالایی را از خود نشان می دهد که باعث بوجود آمدن زودترین شکل شکاف ممکن می گردد. دلیل استفاده از این بتن ها در قطعه های خود - خشک، درجه خود-خشکی بسیار بالای آنها می باشد. ساختار بسیار متراکم بتن های با کارایی بالا، ممکن است به این نظر بیانجامد که تبخیر آب بسیار اندک است و بنابراین آب تنها می تواند با سرعت بسیار پایین در اطراف

آن نفوذ کند. به عبارت دیگر نفوذ آب، سرعت کافی برای رسیدن به اجزاء درونی را نخواهد داشت. در نتیجه ممکن است محافظت را نادیده انگارند. ذخیره کردن زمان محافظت تأثیر مثبتی بر روی هزینه های ساخت خواهد داشت. به عبارت دیگر، هنگامی که بتن را در معرض هوا قرار می دهند، تبخیر آب مشاهده می شود که باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری خواهد شد و به تدریج ترکهایی کوچک پدیدار می گردند. برخی پژوهش های انجام شده در مورد HSC، شکست روش های قدیمی را نشان می دهند. محافظت رطوبتی برای مدت زمان طولانی تر - حتی فرو بردن در آب - اجازه نخواهد داد که ویژگی های فنی بطور مثبتی تحت تأثیر واقع گردند.

ملاحظات تئوریک

ایده و هدف اصلی، ساخت یک منبع آب در بتن می باشد که مستقل از محیط بوده و به آب سیمان غیرهیدرات این امکان را می دهد که به پروسه های هیدراسیون ادامه داده و درجه رطوبت ملات سیمان را در مراحل خشک سازی و سخت سازی برابر نماید. دانه های سبک (LWA) بطور کلی توان بالایی در ذخیره آب از خود نشان می دهند. توزیع یکنواخت آنها در ملات سیمان و انتقال مداوم آب از LWA به ملات سیمان، باعث می شود هر ذره از LWA به یک منبع آب برای بتن های پیرامون، انتقال یابد. انتقال آب به بتن، به ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی بتن و به میزان رطوبت موجود بستگی دارد. به هنگامی که مرحله سخت سازی بتن انجام می گیرد، در ملات سیمان یک سیستم از روزه ها گسترش می یابد. بتن گاز سیلیکا نسبت به بتن های نرمال یک ساختار منفذی تصفیه شده ای به همراه تجمع کوچکتری را از خود نشان می دهد. تجمع این منفذها از منفذهای LWA کوچکتر است، پس بنابراین نیاز به انتقال آب بدلیل وجود گرادیان رطوبت می باشد. طی مراحل سخت و یا خشک سازی بتن، مدارج رطوبت در سطوح میکروسکوپی مشخص

می شود. در سطح میکروسکوپی، با کمبود آب روبرو می شویم که بدلیل واکنشهای شیمیایی اتفاق می افتد. نیروهای مویی (باریک) ملات سیمان به اندازه کافی قوی هستند که آب را از ذرات LWA جذب کرده و آنرا به ملات سیمان "خشکتر" به جایی که در آنجا واکنش های شیمیایی با سیمان غیرهیدرات و با فرمول $Ca(OH)_2$ انجام میگیرد، انتقال دهند. پس از انجام واکنش $Ca(OH)_2$ با گاز سیلیکا، هیدراسیون جدیدی از نوع هیدرات کلسیم سیلیکا ساخته می شود، که در منفذهای باریک (مویی) فضای در دسترس و در شکافهای میکروسکوپی نیز رشد کرده، ساختار ملات سیمان را متراکم تر (چگال تر) می نماید. همانگونه که C-S-H مقاومت بالاتری نسبت به $Ca(OH)_2$ دارد، بر مقاومت فشاری نیز افزوده می گردد. چون نیروهای مکش در منفذهای باریک رابطه عکس با شعاع دارند، منفذهای مویی کوچک تر ملات سیمان نیروهای مکش بالاتر در منفذهای کوچکتر را کسب می کنند. بنابراین تفاوتی بین فشارها (مانند شرایط انتقال آب از LWA به ملات سیمان) را ارائه می دهند. این انتقال را به هنگام موازنه بودن نسبت رطوبت در LWA و ملات سیمان سخت شده، می توان قطع نمود. در سطوح ماکروسکوپی (درشت نمود) درجه رطوبت سطوح اجزاء بتن را در معرض محیط فرض کرده ایم. رطوبت محیط از لحاظ نسبی پایینتر است، درجه بین لایه سطحی و لایه های فاصله دارتر، بیشتر می باشد. درجه، بدلیل بخار آب افزایش می یابد و در لایه سطحی، رطوبت از LWA سریعتر از لایه های درونی به ملات سیمان منتقل می شود. چون میزان آب در LWA از لحاظ شیمیایی محدود است، ساختار بتن در سطح آن دارای دانسیته بیشتر بوده و کاهش بخار آب و مراحل انتشاری آهسته انجام می گیرد. اگر سطح بتن های گاز سیلیکا مخلوطی از دانه هایی که متراکم تر (چگال تر) از HSC های قدیمی هستند، در معرض هوای خشک قرار گیرد بر ویژگی های آن تأثیر منفی نخواهد داشت.

وظیفه این پژوهش، انتقال این ایده به عمل بوده و در عین حال بایست یک بتن مقاومت بالا که بخشی متشکل از LWA است را گسترش دهد تا بتوان آنرا

در سالهای آغازین بصورت تنها تولید کرد و سپس بدون بکار بردن هیچ گونه بهبودسازی به ویژگی های بهبود یافته آن دست یافت.

برنامه پژوهش

ویژگی های مواد و رویه بهینه سازی:

بهینه سازی از یک مخلوط مرجع بتن مقاومت بالا که شامل مواد زیر است آغاز می گردد:

450 Kg/m³ سیمان نوع CEMI 4205 ، 30 kg سیلیکای خشک اضافه شده به عنوان ماده آبی، 13/6 L/m³ سوپرپلاستیسایزر و 1/75 L/m³ تأخیر دهنده. دانه های سبک نرمال (NWA) در مقادیر 1735 kg/m³ و شن و ماسه گرده شده خشک می باشند، و در اندازه های ماکزیمم 16 mm تهیه شده اند که بصورت قسمتهای کوچکی که در زیر آمده از هم جدا گردیده اند: 399 kg/m³ قسمتهای 0/2 ، 208 kg/m³ قسمتهای 2/4 ، 399 kg/m³ قسمتهای 4/8 و 729 kg/m³ قسمتهای 8/16. نسبت آب به سیمان 0/33 می باشد. دانسیته آماده این بتن 2350 kg/m³ بوده و توان کاری آن پس از 10 دقیقه مخلوط شدن، در جدول جریان، $a_{10} < 50$ cm است. مقاومت فشاری در مکعب های 100 میلیمتری بتن 28 روزه $\beta_{c,100,28}=104$ MPa می باشد. مکعبها، بر اساس استاندارد DIN 1048 [7] اصلاح شده اند و ضمناً 6 روز در آب و 21 روز در هوای خشک با دمای $T=20^\circ$ C و RH 60% نگهداری شده اند.

برای بهینه سازی، میزان سیمان و آب ثابت نگه داشته می شود، در حالیکه بخشی از دانه های سبک نرمال را بوسیله چندین گونه گسترش یافته LWA سفالی ، که هر یک در اندازه های معین هستند، جایگزین گردیده است. همان گونه که در جدول های 1 و 2 نشان داده شده است ، LWA ها در اندازه ذره ها، مقاومت، دانسیته، تخلخل و جذب آب و همچنین در میزان رطوبت متفاوت می باشند.

Table 1: Properties of lightweight aggregates by sprinkling

Code	Grain Size [mm]	Dry Density [kg/m ³]	Moisture [% by mass] after ½ hour of	
			Submersing*	sprinkling
A	0/2	1516	-	19,8
B	2/4	950	8,2	7,9
C	3/6	1300	11,1	16,3
D	4/8	930	11,8	12,5
E	4/8	1420	6,1	7,8

*declared by the producer

Table 2: Properties of lightweight aggregates wetted by submersing

Code	Grain Size [mm]	Dry Density [kg/m ³]	Moisture [% by mass] after	
			½ hour	24 hours
F	2/4	950	8,2	20,8
G	3/6	1300	-	11,6
H	4/8	930	11,1	18,3
I	4/8	930	11,1	16,5
J	4/8	1420	6,1	20,2

برای توصیف LWA در مخلوط بتن، دو حالت وجود دارد:

1- خشک

2- خیس

هنگامی که ذرات خشک را شرح می دهیم، درجه جذب آب LWA را بایست شناخت و به هنگام محاسبه میزان آب مورد نیاز برای افزودن، بایست آنرا مورد توجه قرار داد. نقطه ضعف موجود این است که به هنگام مخلوط و سخت کردن تعیین دقیق درجه جذب آب امکان ندارد. بعلاوه، میزان جذب رطوبت LWA در بتن های تازه، بطور قابل ملاحظه ای با میزان جذب آب متفاوت است. باید به

این نکته نیز توجه نمود که آب افزوده شده به مخلوط، از طریق LWA جذب نشده و ممکن است بخار شود، پس نمی توان با این روش به مخزن آب مورد نیاز دست یافت.

خیس کردن را می توان از طریق فرو بردن و یا پاشیدن آب در زمان داده شده انجام داد. در این موارد، می توان میزان رطوبت را از روش ساده خشک کردن، مشخص نمود ولی میزان آب چسبیده به سطح LWA نیز مشخص نیست. آب سطح را می توان از روش CM-Method که به تازگی برای تعیین رطوبت ماسه ها بکار رفته، اندازه گیری و تعیین کرد. در اینجا از روش فرو بردن 24 ساعته استفاده شد.

دو مخلوط بتن متفاوت بوسیله LWA های ارائه شده در جدولهای 1 و 2، طراحی گردید. جدول 3 نوع و میزان دانه های سبک نرمال و LWA بکار رفته را بصورت درصدی از کل میزان دانه ها، به ما نشان میدهد. 1 m^3 بتن شامل kg 450 سیمان و 150 لیتر آب و $1/75$ لیتر تأخیر دهنده می باشد.

Table 3: Mix proportions per m^3 concrete

Mix	Aggregates			Super-plasticizer	Silica Fume*	
	NWA	Lightweight				
	[%] by vol.	Type	Replaced Fraction			
I	75	25	A	sand	6,8	30
II	90	10	B	2/4	6,8	30
III	80	20	F	2/4	6,8	30
IV	90	10	C	3/6	6,8	30
V	80	20	G	3/6	6,8	30
VI	85	15	D	4/8	13,6	30
VII	85	15	J	4/8	13,6	30
VIII	85	15	E	4/8	13,6	30
IX	85	15	H	4/8	13,6	30
X	80	20	I	4/8	13,6	45

dry mass of the slurry

آزمایش مقدماتی بر روی مکعب های 100 میلیمتری بهبود یافته در شرایط زیر انجام پذیرفت:

kk در هوا به دمای T بین 15 و 25 درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی (RH) متغیر از 40% تا 45% ، KR در هوا به دمای T=20° C و RH=65% ، KL مهر شده با آلومینیوم و ورقه پلی اسید، و NK فرورفته در آب به مدت 6 روز و سپس در هوای T=20° C و RH=65% همانگونه که در همه مخلوط های با مقاومت فشاری بالا نشان داده شد.

مخلوط VII بهترین توان کاری و یکنواختی توزیع LWA در ملات سیمان، را از خود نشان داد. LWA نوع J ویژگی های برتری چون مقاومت 115 مگاپاسکال به همراه تخلخل 50% و میزان جذب آب 20% را دارا می باشد. شکل 1، اندازه توزع منفذها را نشان می دهد.

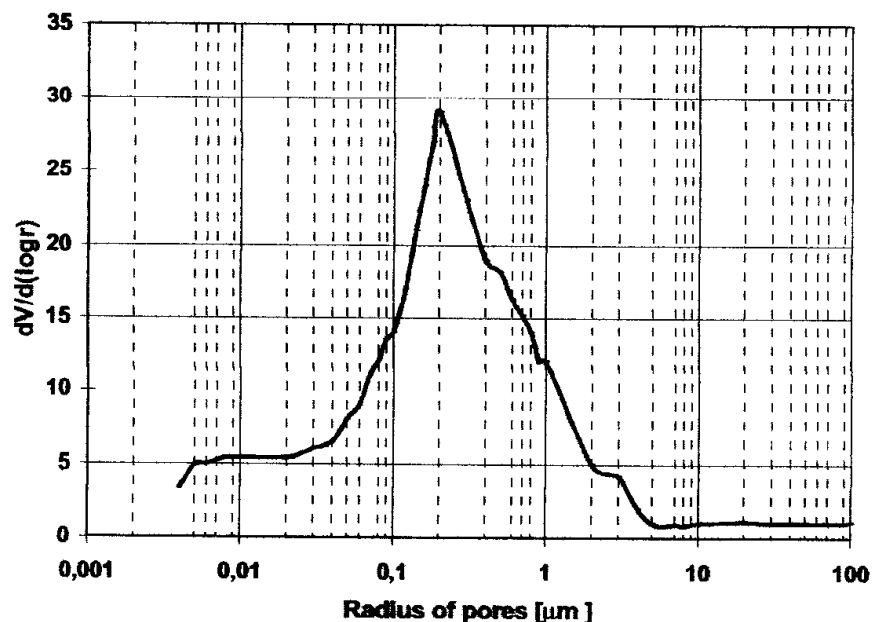


Fig. 1: Pore size distribution of lightweight aggregates type J [9]

به همراه HSC مرجع، یک تبخیر آب نسبی بالا مشاهده می گردد که بایست بوسیله منبع آب پوشیده شود؛ آب مورد نیاز برای ذخیره کردن در LWA ، 47 لیتر می باشد. لازم است که قطعه 4/8 میلیمتری که دارای وزنی بیش 234 کیلوگرم، بطور کامل جایگزین شود. دانه های باقیمانده، دانه های سبک نرمال در مقدار 1298 kg/m^3 می باشد که به 471 kg/m^3 قطعه 0/2 ، 260 kg/m^3 قطعه 2/4 ، 567 kg/m^3 قطعه 8/168 تقسیم می گردد. میزان گاز سیلیکا به 450 کیلوگرم توده خشک افزایش می یابد. دانسیته خشک بتن 2150 kg/m^3 توان کاری آن $a_{10} < 50 \text{ cm}$ و $\beta_{c,100,28} = 104 \text{ MPa}$ می باشد.

مدل سازی انتقال آب در ملات سیمان

نتایج آزمایش مرکوری، بصورت توزیع دیفرانسیلی حجم منفذ در برابر شعاع منفذ، ارائه شده است. در اینجا از درجه های لگاریتمی استفاده می شود. با طرح ریزی $\log dv/dr$ در برابر $\log r$ ، ناحیه زیرین منحنی توزیع با حجم منفذ برابر خواهد بود. با استفاده از این منحنی ها، سیستم گسترده منفذهای ملات سیمان را می توان بوسیله شعاع معادل منفذ تعریف کرد. نمونه ای از این نکته در معادله (1) نشان داده شده است:

$$r^2_{eq} = \left(\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV}{d \log r} \cdot r^2 \cdot d \log r \right) / \left(\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV}{d \log r} \cdot d \log r \right)$$

معادله 1

معادله شعاع معادل منفذ بطور نسبی در مورد منفذهای دارای شعاع کوچکتر، صحیح می باشد. با استفاده از مرحله انتقال در یک تک منفذ مویی به شعاع

r_{eq} ، انتقال آب از سیستم منفذ را می توان به سادگی مدل سازی نمود. فرض کنیم یک متغیر تجمع (Radii) در سیستم منفذ وجود دارد که با تجمع (Radii) کوچکتر، بسوی تعداد بیشتری از منفذها تمایل دارد، $r_{eq}=f(t)$ وابسته به زمان ، آنگاه با افزایش عمر بتن، کوچکتر خواهد شد. هنگامی که مرحله سخت سازی آغاز شد، شعاع معادل منفذ که در سالهای اولیه بتن وجود دارد را می توان به عنوان بزرگترین شعاع معادل منفذ $r_{eq,max}$ به حساب آورد، در حالیکه در سالهای بعدی بتن، هنگامی که همه آب ها باید منتقل شوند، این شعاع به عنوان کوچکترین شعاع معادل منفذ $r_{eq,min}$ مشاهده خواهد شد. در این زمان ها، تعداد منفذها ثابت خواهد بود. در آغاز مرحله هیدراسیون همه منفذهای مویی که بوسیله $r_{eq,max}$ تعریف می شوند از آب پر گشته و و بدلیل فشار و تنش مویی که در سطح آب وجود دارد یک موازنه هیدروستاتیک، ایجاد میگردد. هنگامی که هیدراسیون و یا خشک سازی انجام می گیرد، منفذها کوچکتر شده و به یک زمان معین t و شعاع منفذ $r_{eq,t} < r_{eq,max}$ دست می یابند، و تفاوتی در فشار مویی پدیدار می شود. در هر زمانی t ، فشار مویی در شعاع منفذها $r_{eq,t}$ از طریق معادله (2) ارائه می شود:

$$P_{\kappa(t)} = \frac{2 \cdot \sigma \cos \Theta}{r_{eq}(t)}$$

معادله 2

آب انتقال یافته از دانه های سبک به ملات سیمان

برای بتن دانه سبک یک شعاع معادل منفذ را برای سیستم منفذهای LWA می توان تعریف کرد، مانند معادله (3) که بوسیله معادله (1) سازگاری یافته است. این فرایند را باید بطور مشابه برای فشار مویی P_{LWA} در منفذها $R_{eq,LWA}$ و بوسیله معادله (4) انجام داد. تعداد و اندازه منفذها در زمان، ثابت می باشد.

$$R_{eq,LWA}^2 = \frac{\int_{R_{min,LWA}}^{R_{max,LWA}} \frac{dV}{d \log R} \cdot R^2 \cdot d \log R}{\int_{R_{min,LWA}}^{R_{max,LWA}} \frac{dV}{d \log R} \cdot d \log R}$$

معادله 3

$$P_{LWA} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{R_{eq,LWA}}$$

معادله 4

برای نشان دادن انتقال آب از LWA به ملات سیمان از یک مدل دو استوانه ای که در تماس هستند، استفاده می کنیم. ملات سیمان را می توان با منفذ مویی به شعاع $r_{eq(t)}$ و منبع آب دانه های سبک مورد توجه را با شعاع معادل

منفذ $R_{eq,LWA}$ به نمایش گذاشت. شکل 2 مراحل مختلف انتقال آب را در زیر نشان می دهد.

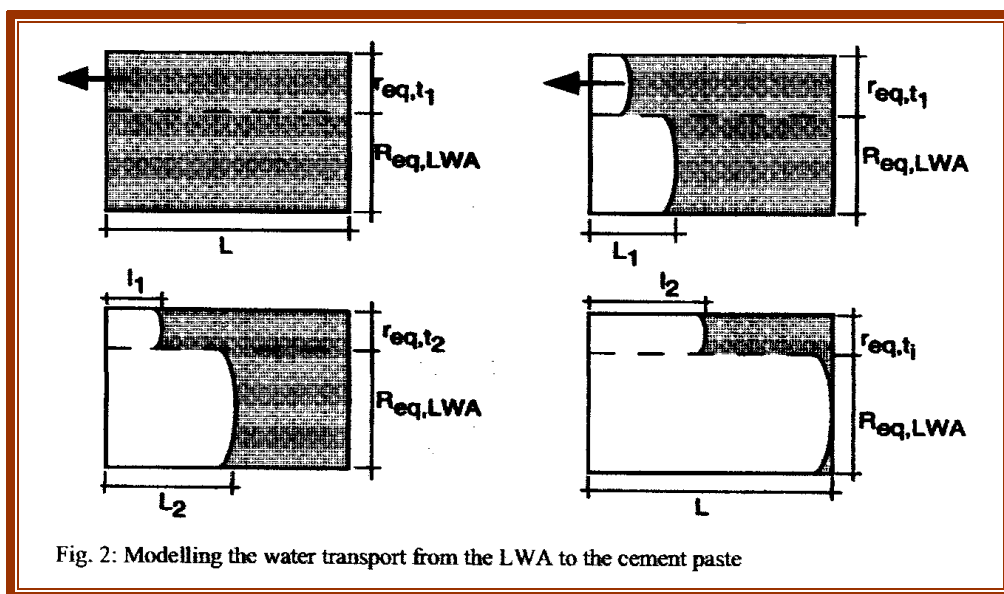


Fig. 2: Modelling the water transport from the LWA to the cement paste

هنگامی که نسبت به مرحله هیدراسیون اقدام شد، منفذ کوچکتر، نیروهای مکش را در منفذ بزرگتر $R_{eq,LWA}$ اعمال کرده و سطح پایین تری از مایع را در فاصله L_1 ایجاد می نماید. هرچه سطح منفذ دارای شعاع $R_{eq,LWA}$ بیشتر باشد، تنش موئی موجود در منفذ کوچکتر نیز بیشتر خواهد بود. هنگامی که این تنش از نیروهای مالشی، در منفذهای کوچکتر $r_{eq(t)}$ متجاوز گردد، سطح مایع تغییر حالت می دهد. تفاوت فشار موئی $\Delta P = P_{k(t)} = P_{LWA}$ ، انتقال موئی را در فاصله L_1 ممکن می سازد. تنها زمان انتقال آب ممکن است که سطح مایع منفذهای کوچکتر به مکان L_1 تغییر حالت دهند. انتقال موئی برای این فاصله :

$$\dot{m} \cdot (L_2 - l_1) = \frac{\sigma}{4\eta} \cdot \left(\frac{1}{r_{eq(t)}} - \frac{1}{R_{eq,LWA}} \right) \cdot r_{eq(t)}^2 \cdot \pi \cdot \rho_w$$

هنگامی که سطح مایع در منفذ بزرگتر، در مکان L است، هیچ تفاوت فشاری ΔP وجود ندارد و مایع باقیمانده در منفذ کوچکتر از طریق انتقال موی بین منفذهای ملات سیمان (که بصورت مشابهی قابل توصیف هستند) یا از طریق انتشار همراه با چگالش، مصرف خواهد شد. از آغاز تا پایان مرحله خشک سازی، این تفاوت از طریق معادله (6) ارائه می شود:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \sigma}{\left(\frac{1}{r_{eq,min}} - \frac{1}{R_{eq,LWA}} \right)} - \frac{2 \cdot \sigma}{\left(\frac{1}{r_{eq,max}} - \frac{1}{R_{eq,LWA}} \right)}$$

معادله 6

برای ممکن ساختن یک محاسبه ساده، فرض کردن یکسان بودن طول L منفذهای LWA و ملات سیمان، لازم بوده و آب موجود نیز باید جریان لامینار (Laminar) را از طریق این منفذها، دارا باشد. چون طول منفذها نامشخص است، به کمک مدل سازی دیگر، می توان ایده فاصله ای که قرار است آب از آنجا منتقل شود، ارائه داد؛ که بوسیله توزیع یکنواخت LWA مورد نظر و با قطعه 4 تا 8 میلیمتر و از طریق ملات سیمان آغاز می گردد. در این مدل سازی، حجم $1m^3$ بتن را می توان به تعداد n اختیاری از اجزاء مرکب کروی تقسیم کرد که دارای شعاع R_{CE} و متشکل از دانه ای به شعاع r_a می باشند و با یک لایه ملات سیمان که ضخامت ثابت دارد، پوشیده شده است. در شکل 3 مدل سازی بتن با استفاده از اجزاء مرکب ارائه گردیده است.

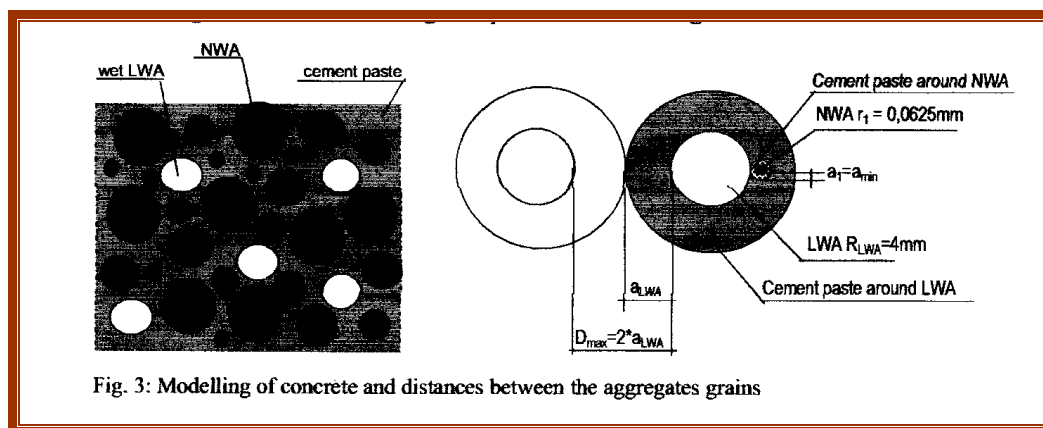


Fig. 3: Modelling of concrete and distances between the aggregates grains

برای مقدار کلی دانه ها Z ، شعاع R_{CE} از طریق معادله (7) محاسبه می گردد که توسط معادله (8) ارائه گردیده است:

$$\frac{1000}{n} = \frac{4}{3} R_{CE}^3$$

معادله 7

$$R_{CE} = \frac{10 \cdot r_a}{\frac{1}{3} \cdot Z}$$

معادله 8

در واقع همه دانه ها، شامل ذره هایی با قطعه های متفاوت هستند. با داشتن تعداد معین از قطعه ها در اندازه β_i می توان بر اساس معادله (8) شعاع r_i وابسته به β_i را بدست آورد. تفاوت در تجمع (Radii) $R_i - r_i$ ضخامت لایه a_i که هر ذره ای باندازه مختلف را می پوشاند، به ما ارائه می دهد. دو برابر فاصله بین

دو دانه دارای اندازه یکسان، برابر است با ضخامت لایه سطحی و فاصله ذره های دارای اندازه یکسان در زیر داده شده است

Table 4: Calculation of the thickness layer and distances between grains

Radius [mm]	Vol. B_i of grains [l]	$10 / (B_i)^{1/3}$	R_i [mm]	a_i [mm]	d_i [mm]
$r_1 = 0.0625$	6.6	5.33	0.33	0.27	0.54
$r_2 = 0.125$	26.4	3.36	0.42	0.29	0.59
$r_3 = 0.25$	46.2	2.79	0.70	0.45	0.89
$r_4 = 0.5$	6.6	5.33	2.67	2.17	4.33
$r_5 = 1.0$	66.0	2.47	2.47	1.47	2.95
$r_6 = 2.0$	92.4	2.21	4.42	2.42	4.85
$r_7 = 4.0$	59.2	2.57	10.26	6.26	12.53
$r_8 = 4 \text{ LWA}$	165.0	1.82	7.29	3.29	6.59
$r_9 = 8.0$	191.4	1.73	13.88	5.88	11.76

دیگر ذرات دانه ها را می توان در فاصله بین ذرات LWA قرار داد. با توجه به اینکه هر ذره LWA یک منبع آب برای حجم ملات سیمان پیرامون می باشد، فاصله ای که آب از آن باید منتقل شود را به سادگی و با توجه به مکان محدود فاصله ماکزیمم و مینیمم می توان تعیین کرد. طولانی ترین فاصله D_{max} ، نامناسب ترین روش برای انتقال آب بین دو دانه سبک $D_{max} = a_8$ می باشد. هنگامی که به خطی بودن آن را توجه نمود، این فاصله می تواند طولانی ترین منفذ مویی باشد. حالتی که برای بتن، مشخص تر است هنگامی است که ذره سبک نرمال در نزدیکترین فاصله ممکن نسبت به LWA قرار گرفته و مانند مانع و سدی در راه آبی که از ملات سیمان رد می شود، ایستاده باشد. چون کوتاهترین راه در این مورد، ضخامت لایه های پیرامون ذرات کوچکتر است، این حالت هنگامی روی می دهد که دانه ای به شعاع $r_1 = 0.0625 \text{ m}$ در مجاورت یک

ذره از LWA موجود باشد. ضخامت لایه، کوتاهترین طول منفذ که با طول مینیمم $D_{min}=a_1$ برابر است، قابل تشخیص خواهد بود.

برنامه آزمایش

در بتن های مخلوط با دانه های سبک، بررسی های ماکرو و میکروسکوپی، تأثیر بهبودسازی خودکار و اعتبار مدل سازی ارائه شده در بالا را نشان می دهند.

در مکعبهای 100 میلیمتری بهبود یافته و در شرایط مختلف، زمان و مقاومت فشاری نیز مشخص می باشند. در شکل 4 تغییرات ثبت شده گروه و نسبت مقاومت فشاری معین شده با ویژگی های مقاومت فشاری، نشان داده شده است.

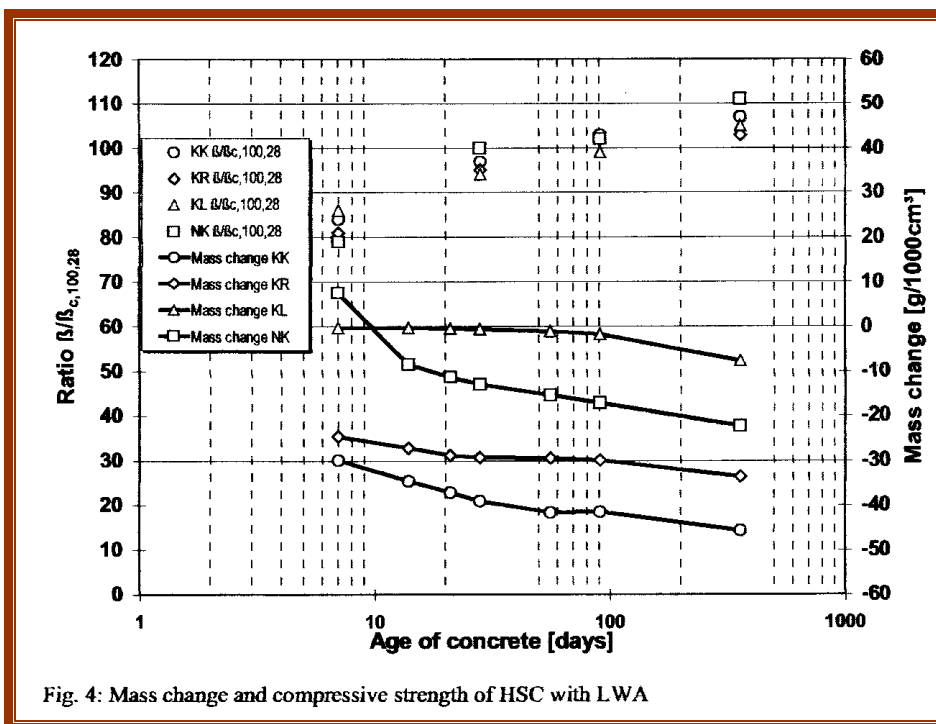


Fig. 4: Mass change and compressive strength of HSC with LWA

از طریق ذخیره کردن قطعات مکعب های خرد شده در شرایط بهبودسازی نامطلوب ، k_k مخزن فیزیکی آب بوسیله ذخیره سازی در یک خشک کن، مشخص گردیده و سپس آنها را دوباره خرد کرده و اجزایی که تنها شامل ملات سیمان و ماسه بودند را جدا ذخیره کردند تا با استفاده از پاراسیمتری مرکوری ارائه شده در شکل 5 توزیع اندازه منفذ را مشخص نمایند.

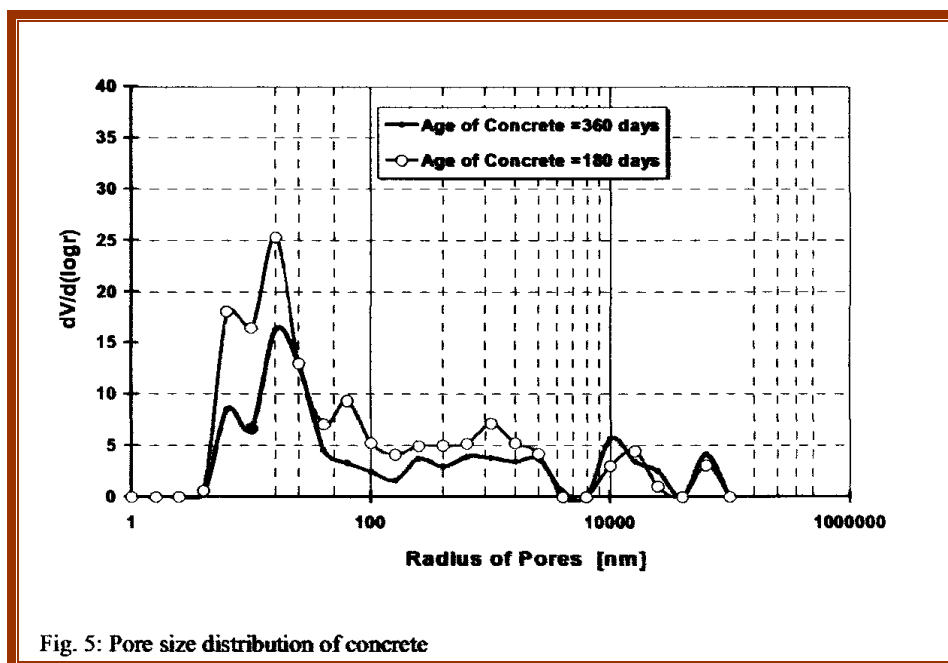


Fig. 5: Pore size distribution of concrete

قسمت دیگر آن قطعه را آسیاب کرده، سپس آنرا در غربالی با اندازه $0/063$ mm غربال نموده که نمونه هایی از ملات سیمان هیدراته غنی، مشاهده شد. مقدار شیمیایی منبع آب و بنابراین درجه هیدراسیون در این نمونه ها در جدول 5 محاسبه و مشخص گردیده است.

Table 5: Calculation of the degree of hydration

Amount of water considered	Age of concrete [days]	
	180	360
Initial in concrete at t=0	150	150
Chemically bound when $\alpha=1$	121	121
Total chemical bound determined by TG and DTA	82	100
Calculated degree of hydration α	0.67	0.82

نتایج اندازه گیری حرارتی (TG) و آنالیزهای دیفرانسیلی حرارتی (DTA) انجام شده، در شکل (6) نشان داده شده است.

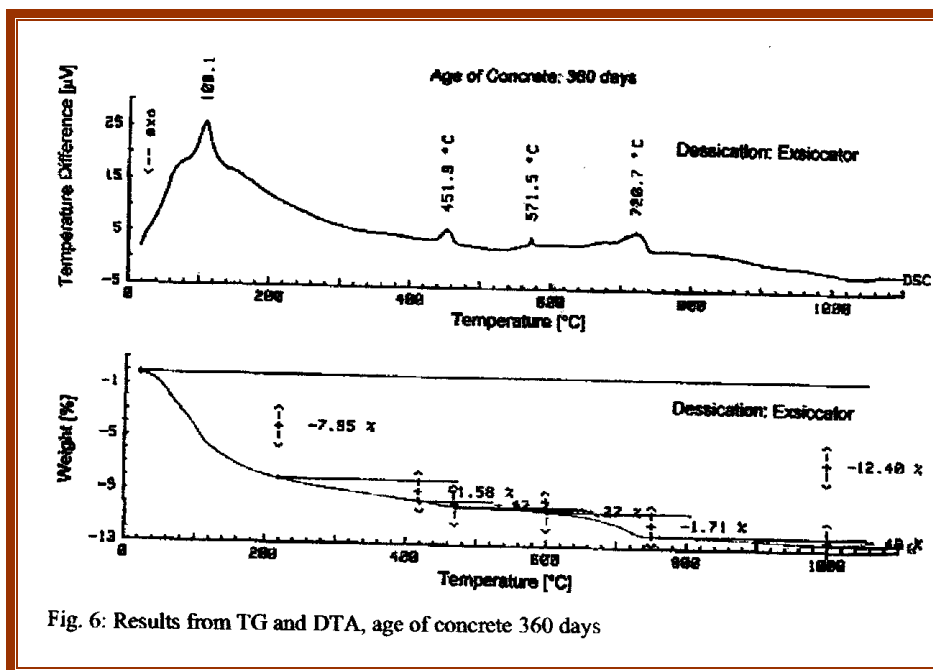
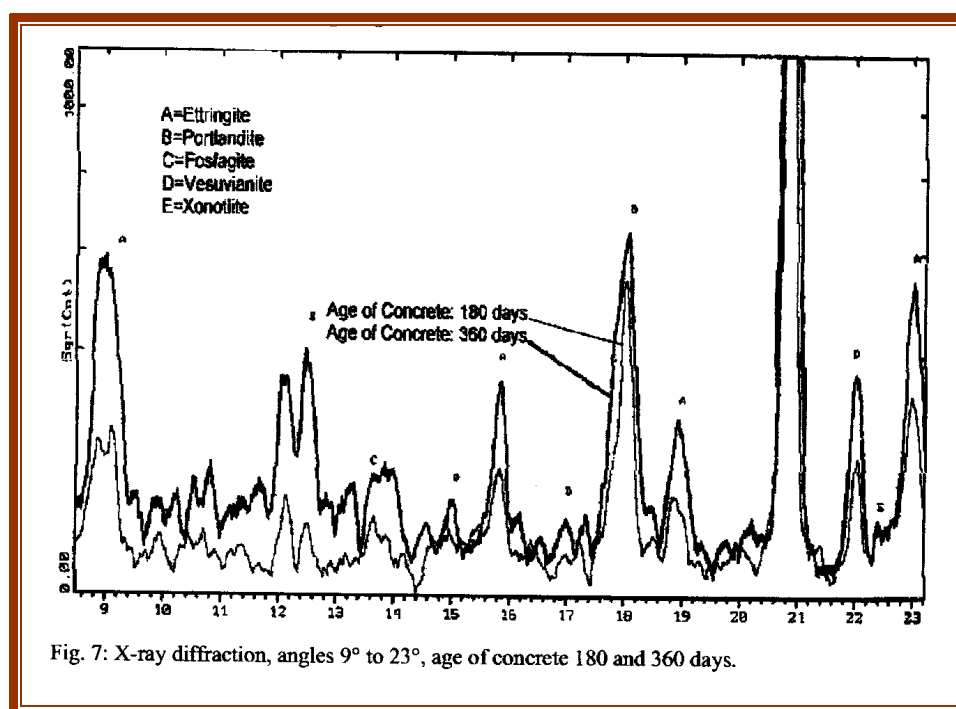


Fig. 6: Results from TG and DTA, age of concrete 360 days

بر روی نمونه های غنی در ملات سیمان، انکسار پرتو - x انجام پذیرفت. در شکل (7)، ترکیبات شیمیایی بدست آمده در بتن های 180 و 360 روزه و به زاویه بازتاب 90 تا 23 درجه نشان داده شده است.



نتیجه

یک افزایش مداوم در مقاومت فشاری در سالهای بعدی عمر بتن، بدون توجه به بهبودسازی، ثبت گردیده است. دلیل افزایش مقاومت فشاری که مستقل از محیط است، در ساختار چگال تر ملات سیمان مشخص شده توسط اندازه گیری تخلخل نهفته است که با افزایش عمر بتن در تخلخل کلی، کاهش واضح را نشان می دهد. در مقایسه توزیع اندازه منفذ بین 360 روزه با بتن 180 روزه، کاهش را در تعداد منفذهای دارای شعاع بزرگ و افزایشی را در تعداد منفذهای دارای شعاع کوچک، مشاهده می کنیم (شکل 5). اصلاح سیستم منفذ، تخلخل کاهش را توضیح می دهد که به این پیش فرض می انجامد که آب واکنش هیدراسیون، بطور قطع در دسترس بوده و از لحاظ شیمیایی،

مخزن موجود می باشد. این درجه هیدراسیون بالاتر (جدول 5) در سالهای بعدی بتن، واکنش شیمیایی با آب اضافی را با ذرات سیمان تصدیق می نماید و بوسیله انکسار پرتو - x مقدار مواد مرکب شیمیایی مانند اکسید کلسیم و اترینگیت را در عمر 360 روز گی، کشف می کند (شکل 7). چون Ca(OH)_2 از هیدراسیون سیمان تولید میشود، باید در ذرات سیمان آب مصرف شود. انکسار پرتو - x در 360 روزه ها، مقدار C-S-H بیشتری را نسبت به 180 روزه ها به نمایش می گذارد. C-S-H اضافی مانند مقادیر بالای Ca(OH)_2 و اترینگیت، از طریق مراحل اضافی هیدراسیون ایجاد می گردد. این عمل برای تداوم مرحله هیدراسیون از 180 روزه تا 360 روزه باقی می ماند. این ابعاد، فرضیه تئوریک مراحل مداوم هیدراسیون که در سالهای بعدی به ساختاری چگال تر خواهد انجامید را تأیید می نماید. این امر بدلیل پر شدن قسمتی از منفذها بوسیله تولیدات اضافی هیدراتی واقع می گردد. تغییر نهایی در منحنی توزیع اندازه منفذ در مسیر منفذهای کوچکتر برای ایجاد فشار مویی بالاتر می باشد که برای انتقال از LWA به ملات سیمان ضروری خواهد بود. از خسارت گروه مکعب ها برخلاف زمان، یک درجه رطوبتی را نشان می دهند. از طریق توزیع اندازه منفذ (شکل 5) و خسارت گروهی (شکل 4)، شرایط انتقال (افزایش فشار مویی و وجود درجه رطوبت) برای مدل سازی نشان داده شده، ارائه می گردد. در مقایسه با HSC تناسبی که تنها شامل NWA است، مقدار مخزن شیمیایی آب در حدود 24 لیتر در هر مترمکعب بتن بالاتر [5] می باشد و تنها نصف مقدار آب ذخیره شده در دانه های انتخاب شده از طریق فرو بردن نشان داده می شود. از اینرو، این بتن، هنوز هم یک مخزن آب در دسترس دارد.

پایان