بررسي نفوذ پذيري بتن در مقابل گاز اکسیژن

محمد شکرچی زاده*[۱]، بابک احمدی[۲] و محمد حسین افتخار[۳]
[۱]دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
[۲]دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
[۲]دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت ۸۶/۷/۷ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۸/۱، تاریخ تصویب ۸۹/۱۰/۲۸)

چکیده

ضریب نفوذپذیري مشخصه‌اي از بتن است که به وسیله آن مي‌توان میزان سهولت یا صعوبت عبور سیال از داخل بتن را به دست آورد. کاهش نفوذپذیري به عنوان کلید پایایي بتن شناخته شده است. در این مقاله، میزان نفوذ پذیري بتن با آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیري بتن در مقابل گاز اکسیژن به روش Cembureau مورد بررسي قرار گرفته است. همچنین نتایج به دست آمده از این آزمایش براي بررسي بهتر، با نتایج حاصل از آزمایش‌هاي نفوذ آب و مقاومت الکتریکي مقایسه گردیده است. به این منظور، از ٤ طرح مخلوط استفاده گردید. این طرح‌ها شامل یک طرح شاهد و سه طرح حاوي دوده سیلیسي با درصدهاي جایگزیني ۵، ۱۰ و ۱۲/۵ بودند و نسبت آب به مواد سیماني و عیار مواد سیماني به ترتیب برابر با ۰/٤ و ٤۰۰ کیلوگرم در متر مکعب نگاه داشته شد. مقایسه نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌ها نشان داد که اولاً دوده سیلیسي مشخصات پایایي بتن را بهبود مي‌بخشد و همچنین آنکه نتایج به دست آمده از نفوذ گاز با نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذ آب همبستگي مناسبي دارد.

واژه هاي کلیدي: نفوذ پذیري اکسیژن، فشار گاز، نفوذ آب، دوده سیلیسي، مقاومت الکتریکي

مقدمه

یک سازه بتني باید بتواند تحت شرایط محیطي و در طول عمر مفید مورد نظر، سرویس دهي کند و عملکرد مناسبي داشته باشد. به چنین بتني، بتن با دوام یا پایا اطلاق مي‌شود. ناکافي بودن دوام ممکن است به علت عوامل داخلي یا عوامل محیطي که بتن در معرض آن قرار مي‌گیرد، باشد.

نفوذپذیري نقش بسیار مهمي در پایایي بتن دارد، زیرا این مشخصه نشان دهنده مقاومت بتن در مقابل ورود سیالاتي همچون آب و گازهاي دي‌اکسید کربن و اکسیژن است. عبور مواد مخربي همچون یون‌هاي کلرید از درون حفرات به هم پیوسته بتن مي‌تواند دلیل آغاز خوردگي آرماتور مدفون در بتن باشد. علاوه براین، پس از آغاز خوردگي آرماتور، سرعت نفوذ گاز اکسیژن به داخل بتن براي انجام واکنش‌هاي خوردگي، از عوامل مؤثر بر شدت خوردگي آرماتور مي‌باشد. درنتیجه، نفوذپذیري به عنوان یک خصوصیت اصلي بتن و در بسیاري موارد پارامتري براي کنترل سرعت واکنش‌هاي خوردگي شناخته مي‌شود. از این رو، تعیین ضریب نفوذپذیري به عنوان پارامتري که مي‌توان به وسیله آن میزان سهولت یا صعوبت عبور سیال از داخل بتن را به دست آورد از اهمیت زیادي برخـــوردار است[۱].

عوامل متعددي همچون نسبت و نوع اجزاء تشکیل دهنده بتن، درجه هیدراسیون مواد سیماني و کیفیت اتصال سنگدانه و خمیر سیمان در ناحیه انتقالي بر نفوذپذیري بتن مؤثرند. بتن‌هاي معمولي اغلب نمي‌توانند به میزان لازم از ورود رطوبت و یون‌هاي مهاجم جلوگیري کنند. استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر دوده سیلیسي مي-تواند نفوذپذیري بتن را کاهش دهد و در نتیجه باعث افزایش مقاومت بتن در برابر خرابي‌هاي ناشي از ورود مواد مهاجم نظیر کلریدها شود[۲].

بیشتر آزمایش‌هایي که براي ارزیابي نفوذپذیري بتن انجام مي‌گیرد بر پایه نفوذ آب تحت فشار است. اخیراً روشي براي تعیین نفوذ پذیري بتن در مقابل گاز اکسیژن ارائه شده است. این روش در چند کشور از جمله فرانسه، پرتغال، آفریقاي جنوبي و... بصورت استاندارد درآمده است و همچنین توسط کمیته تخصصي RILEM توصیه گردیده است. از مزایاي استفاده از اکسیژن نسبت به آب براي ارزیابي نفوذ پذیري بتن سهولت، سرعت بیشتر و تکرارپذیري انجام آزمایش است. همچنین در هنگام ورود آب به داخل بتن، به دلیل واکنش هیدراسیون، ریزساختار

* نویسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۹۵۰ , فاکس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ , Email: shekarch@ut.ac.ir

بتن مي‌تواند دستخوش تغییرگردد، در حالیکه این مشکل براي گاز اکسیژن وجود ندارد [۳].

در این مقاله، نفوذپذیري بتن در مقابل گاز اکسیژن با استفاده از روش Cembureau [۴] بررسي شده است. همچنین، آزمایش‌هاي نفوذ آب و مقاومت الکتریکي ویژه براي مقایسه با نتایج آزمایش نفوذپذیري در مقابل اکسیژن انجام پذیرفت. به همین منظور، چهار طرح اختلاط مختلف شامل طرح شاهد و طرح‌هاي حاوي ۵، ۱۰ و ۱۲/۵ درصد دوده سیلیسي ساخته شد.

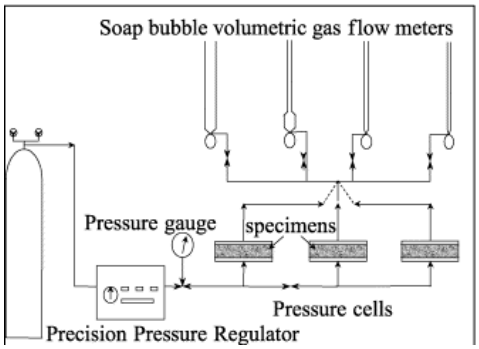
معرفي آزمایش نفوذ پذیري در مقابل اکسیژن به روش Cembureau

در این روش، ضریب نفوذ پذیري ویژه (K_o) براي گاز اکسیژن که تحت فشار از داخل بتن عبور مي‌کند بدست مي‌آید. این ضریب در محدوده 10^{-14} m^2 تا 10^{-19} m^2 محاسبه مي‌گردد. البته با تغییر ریز ساختار بتن در طول زمان، این ضریب کاهش مي‌یابد. مبناي محاسبه ضریب نفوذپذیري ویژه (K_o) رابطه Hagen-Poiseuille (رابطه ۱) براي جریان لایه‌اي یک سیال قابل تراکم در یک محیط متخلخل با حفرات کوچک تحت شرایط پایدار است. این رابطه را به صورت حل شده براي K_o مي توان به صورت زیر نوشت:

$$Ko = \frac{2.Q.p_a.L.\eta}{A\left(p^2 - {p_a}^2\right)} \qquad (۱)$$

که در آن، K_o ضریب نفوذ پذیري ویژه (m^2)، Q دبي جریان ($m^3\ s^{-1}$)، A سطح مقطع آزمونه (m^2)، L ضخامت آزمونه در جهت جریان (m)، η ویسکوزیته گاز ($N\ s\ m^{-2}$ ۲/۰۲×۱۰-۵ براي اکسیژن)، p فشار دروني ($N\ m^{-2}$)، p_a فشار بیروني ($N\ m^{-2}$) مي باشد.

بر پایه این روش، آزمونه‌هاي استوانه‌اي بتني، با قطر ۱۵۰ mm و ارتفاع ۵۰ mm، ساخته مي‌شود. پس از عمل آوري به مدت ۲۸ روز، مقدماتي براي یکسان سازي رطوبت داخلي آزمونه ها انجام مي‌گیرد. به همین منظور، دو رژیم متفاوت پیشنهاد شده است. رژیم A شامل نگهداري آزمونه‌ها در فضاي آزاد در دماي ۲ ± ۲۰ سانتیگراد و رطوبت نسبي ۵ ± ۶۵ درصد بمدت ۲۸ روز و رژیم B شامل نگهداري آزمونه‌ها در آون با دماي ۵ ± ۱۰۵ درجه سانتي‌گراد به مدت هفت روز و قرارگیري سه روزه در خشک‌کن در دماي ۲ ± ۲۰ درجه سانتي‌گراد پیشنهاد شده‌اند. بعد از این مقدمات، آزمونه‌ها در داخل دستگاه قرار مي‌گیرند. تصویر شماتیک این دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این دستگاه گاز اکسیژن تحت فشار بر روي یک سطح آزمونه در حالیکه دور آن با رینگ لاستیکي کاملا پوشیده و نگاه داشته شده است، اعمال مي‌شود. مقادیر فشارهاي پیشنهاد شده در محدوده ۱/۵ bar تا ۳/۵ bar قرار دارند. سرعت گاز عبوري از داخل آزمونه‌ها توسط حرکت حباب صابون در استوانه-هاي مدرج اندازه گیري مي‌شود. در پایان، ضریب نفوذ پذیري ویژه آزمونه‌ها بر اساس رابطه (۱) محاسبه مي-گردد. قابل ذکر است، از آنجا که اکسیژن به راحتي از آب عبور نمي‌کند، هرچه درجه اشباع بتن بیشتر گردد ضریب نفوذ پذیري کاهش مي‌یابد. بر همین اساس، نتایج این روش بستگي زیادي به درجه اشباع بتن دارد[۵]. باید توجه داشت ضریب نفوذپذیري به ریز ساختار بتن، توزیع تخلخل‌ها و نحوه ارتباط آنها بستگي دارد. البته بوسیله این آزمایش امکان تعیین وضعیت تخلخل‌ها وجود ندارد. براي اینکار معمولاً از روش تخلخل سنجي جیوه استفاده مي-شود.



شکل ۱:تصویر شماتیک دستگاه **Cembureau** برگرفته از مرجع **[۵]**.

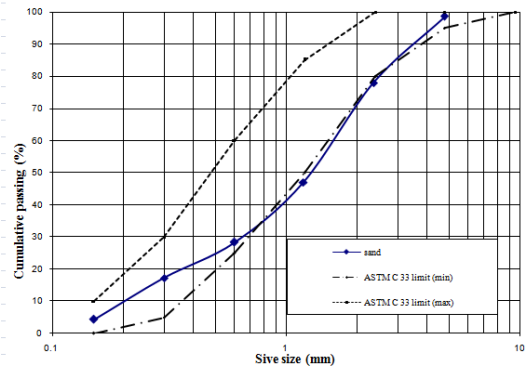
مشخصات مصالح مصرفي

سیمان مورد مصرف سیمان تیپ II تهران بوده است. دوده سیلیسي مورد مصرف محصول کارخانه فروسیلیس ازنا است. مشخصات شیمیایي و وزن مخصوص این دو ماده در جدول (۱) ارائه شده است. وزن مخصوص، جذب آب ماسه استفاده شده به ترتیب برابر با ۲/۵۹، ۲/۵۸ % و مدول نرمي آن ۳/۲۷ بود. شن مورد استفاده ترکیبي از دو شن نخودي (۱۲-۴ میلي‌متر) و شن بادامي (۱۶-۶ میلي‌متر) بوده است. از نسبت وزني شن نخودي

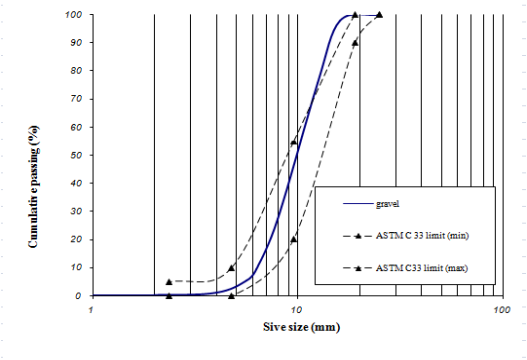
بهشن بادامي برابر با ۲۰ به ۸۰ استفاده شد، زيرا دانه بندي تركيب دو شن با اين نسبت در محدوده استاندارد مقرر در ASTM C33 قرار مي‌گيرد. وزن مخصوص و جذب آب شن مصرفي به ترتيب برابر با ۲/۷۸ و ۱/۹۷ % بود. نمودار دانه بندي مصالح سنگي در مقايسه با حدود مقرر در ASTM C 33 در شكل‌هاي (۲) و (۳) مشخص شده است. در طرح اختلاط بتن‌هاي ساخته شده از فوق روانساز با پايه نفتاليني استفاده شد.

جدول ۱: آناليز شيميايي و وزن مخصوص مواد سيماني .

اكسيدهاي تشكيل دهنده	سيمان تيپ II تهران	دوده سيليسي
SiO_2	۲۱/۴۲	۹۳/۱۶
Al_2O_3	۴/۶۸	۱/۱۳
Fe_2O_3	۳/۶۸	۰/۷۲
CaO	۶۳/۲۵	-
MgO	۳/۶۳	۱/۶
SO_3	۱/۷۴	۰/۰۵
Na_2O	۰/۲۵	-
K_2O	۰/۷۵	-
L.O.I	۰/۴۵	۱/۵۸
مجموع	۹۹/۴۰	۹۸/۲۴
وزن مخصوص	۳/۱۴	۲/۲۰



شكل ۲: نمودار دانه‌بندي ماسه.



شكل ۳: نمودار دانه‌بندي شن.

طرح‌هاي اختلاط

چهار طرح اختلاط حاوي درصدهاي مختلف دوده سيليسي تهيه شد. در همه اين طرح‌ها نسبت آب به مواد سيماني برابر با ۰/۴۰ و عيار مواد سيماني برابر با kg/m^3 ۴۰۰ در نظر گرفته شد. نسبت مصالح سنگي درشت‌دانه به ريزدانه برابر با ۱:۱ و وزن كل آن برابر kg/m^3 ۱۸۴۰ بود. به منظور افزايش رواني مخلوط‌ها از فوق روانساز در طرحها استفاده گرديد. كد طرح ها و مشخصات بتن تازه چهار مخلوط بتن در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: كد طرح‌ها و مشخصات بتن تازه.

كد طرح	ميزان جايگزيني دوده سيليسي (%)	وزن ماده جايگزين سيمان (kg/m^3)	وزن سيمان (kg/m^3)	وزن فوق روانساز (kg/m^3)	اسلامپ (mm)	ميزان هواي تصادفي (%)
C	-	-	۴۰۰	۳/۲	۶۵	۲/۴
SF5	۵	۲۰	۳۸۰	۳/۸	۴۵	۳/۲
SF10	۱۰	۴۰	۳۶۰	۴/۸	۴۰	۲/۸
SF12.5	۱۲/۵	۵۰	۳۵۰	۴/۸	۷۰	۳/۶

ساخت و آماده سازي آزمونه ها

به ازاي هر طرح يک آزمونه استوانه اي ، با قطر ۱۵۰ mm و ارتفاع ۳۰۰ mm، براي آزمايش نفوذ پذيري در مقابل گاز، سه آزمونه منشوري به ابعاد ۱۲۰×۲۰۰×۲۰۰ mm براي آزمايش نفوذ آب و سه آزمونه مكعبي به ابعاد ۱۰۰ mm براي آزمايش مقاومت الكتريكي ساخته شد. براي ساخت اين آزمونه‌ها در ابتدا مصالح خشک با هم در داخل مخلوط كن مخلوط شدند. پس از آن، قسمت اعظم آب طرح به مخلوط اضافه گرديد. در پايان نيز، فوق روانساز به همراه آب باقي‌مانده اضافه شد. عمليات متراكم كردن مخلوط‌هاي بتن توسط ميز لرزان، بلافاصله پس از اختلاط و پر كردن قالب‌ها انجام شد. آزمونه ها به مدت تقريبي ۲۴ ساعت درون قالب نگهداري شدند و در طول اين مدت، روي قالب‌ها با گوني خيس پوشانده شده بود. پس از باز كردن قالب‌ها آزمونه‌ها درون آب آهک اشباع به مدت ۲۸ روز و در دماي ۲۳ درجه سانتي‌گراد عمل آوري شدند. پس از مدت عمل آوري، بوسيله دستگاه برش، يک ديسک با ارتفاع ۵۰ mm از

سطح بالاي هر استوانه به منظور انجام آزمايش نفوذپذيري در مقابل گاز اكسيژن بريده شد. ديسک‌هاي به دست آمده، ابتدا هفت روز در آون با دماي ۱۰۵ درجه سانتيگراد قرار داده شدند و پس از آن آون خاموش گرديد و سه روز ديگر ديسک‌ها در آون نگهداري شد. (رژيم B پيشنهاد شده در روش Cembureau).

شرح آزمايش‌ها

آزمايش‌هاي نفوذپذيري در مقابل گاز اكسيژن با روندي كه پيش از اين توضيح داده شد بر روي ديسک-هاي به دست آمده در ۵ فشار مختلف انجام پذيرفت.

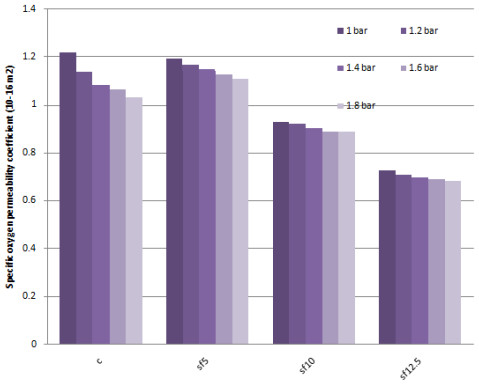
براي تعيين عمق نفوذ آب در بتن، آزمونه‌ها در ابتدا، درون دستگاه نفوذ آب قرار گرفته و به مدت ۴ روز، تحت فشار bar ۵ قرار گرفت. پس از اين مرحله، آزمونه‌ها به صورت قطري توسط جک فشاري شكسته شدند تا عمق نفوذ آب بدست آيد. عمق نفوذ آب در هر آزمونه، بصورت ميانگين مقدار نفوذ در چهار نقطه محاسبه شد. نتايج مربوط به هر طرح اختلاط بر اساس متوسط عمق نفوذ سه آزمونه بدست آمد. براي اندازه‌گيري مقاومت الكتريكي آزمونه‌ها، از دستگاه مقاومت الكتريكي كه بر مبناي جريان متناوب (AC) عمل مي كند، استفاده گرديد. علت استفاده از جريان متناوب اين است كه از اثر پولاريزاسيون در بتن جلوگيري شود [۶]. همچنين اين دستگاه اين قابليت را دارد كه با تغيير خودكار فركانس جريان اثر خازني مصالح را حذف كند. به بيان ديگر، امپدانس جريان صفر مي‌شود. براي انجام اين آزمايش، سه آزمونه مربوط به هر طرح از مخزن عمل آوري خارج و به مدت يک ساعت در فضاي آزاد نگهداري شد. قبل از اعمال جريان متناوب، خمير سيماني بر دو وجه موازي آزمونه‌ها اعمال شد تا از تماس كامل دو صفحه اتصال دستگاه به دو سطح موازي آزمونه اطمينان حاصل شود. با صفر كردن امپدانس جريان، مقاومت الكتريكي بر حسب K.Ω براي هر آزمونه محاسبه گرديد. از آنجايي كه ابعاد آزمونه در مقاومت الكتريكي آزمونه موثر است مقاومت الكتريكي ويژه كه جزء خواص ذاتي مواد است با رابطه زير محاسبه شد.

$$\rho = \frac{A.R}{L} \qquad (۲)$$

كه در آن ρ مقاومت الكتريكي ويژه (K.Ω.cm)، R مقاومت الكتريكي (K.Ω)، A سطح مقطعي كه جريان از آن مي‌گذرد (cm^2)، L طول آزمونه در جهت جريان (cm) است. در نهايت، متوسط مقاومت الكتريكي ويژه سه آزمونه براي هر طرح محاسبه شد.

نتايج و تحليل

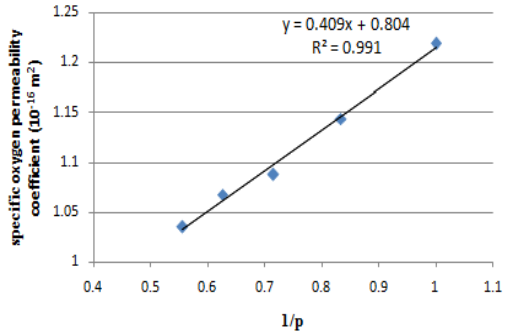
ضرايب نفوذ پذيري گاز اكسيژن (K_o) در نمودار شكل (۴) ارائه شده است. همانطور كه از اين نمودار مشخص است، هرچه درصد جايگزيني دوده سيليسي افزايش پيدا كرده است نفوذ پذيري بتن در مقابل گاز اكسيژن كاهش يافته است. علت اين امر بهبود ريزساختار بتن به سبب واكنش پوزولاني دوده سيليسي مي‌باشد. Alexander و Magee [۷] نيز نشان دادند با استفاده از دوده سيليسي در بتن، ضريب نفوذپذيري در مقابل گاز اكسيژن به سبب انجام واكنش پوزولاني و بهبود ريزساختار كاهش مي يابد.



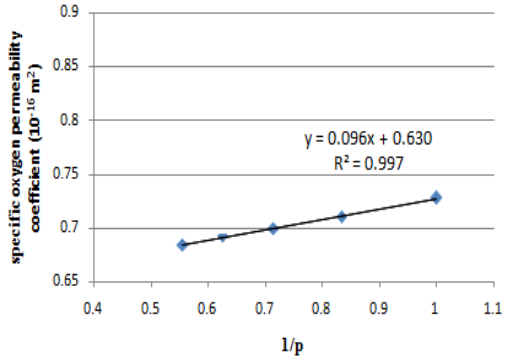
شكل۴: ضريب نفوذپذيري بتن در برابر گاز اكسيژن.

با بررسي نتايج به دست آمده در هر طرح، مشخص مي‌گردد كه با افزايش فشار اعمال شده، ضريب به دست آمده براي نفوذ پذيري گاز اكسيژن كاهش مي‌يابد. علت اين پديده، اثر Klinkenberg يا لغزش مولكول‌هاي گاز مي‌باشد. مولكول‌هاي گاز نزديک ديواره منافذ موئينه داراي سرعت حدي حداقلي مي‌باشند، درنتيجه ميزان جريان گاز از منافذ موئينه بيش از مقدار پيش بيني شده در روابط مي‌باشد. اين اثر وقتي پديد مي آيد كه مسير عبور گاز نسبت به قطر منافذ موئينه به اندازه كافي بزرگ باشد. ميزان اين اثر به توزيع اندازه حفرات و متوسط اختلاف فشار اعمالي بستگي دارد. هرچه اين اختلاف فشار بيشتر شود، ميزان اين اثر كاهش مي‌يابد. البته با روابطي مي‌توان اين اثر را حذف نموده و ضريب نفوذپذيري واقعي-تري ارائه نمود. محققين مختلف در آزمايش نفوذپذيري در

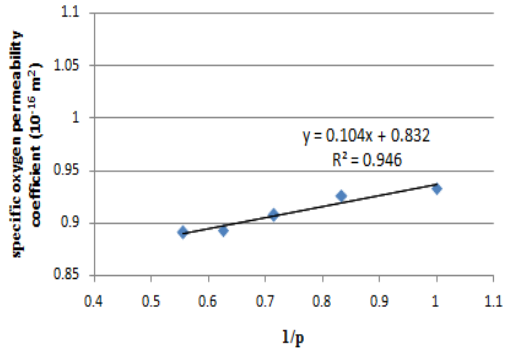
مقابل اکسیژن از فشارهاي متفاوتي استفاده کرده‌اند [۹-۷]. به نظر مي‌رسد با استاندارد سازي مقدار فشار اعمالي گاز اکسیژن، مي‌توان نتایج به دست آمده از تحقیقات مختلف را بهتر با هم مقایسه کرد. با تحلیل نتایج آزمایش‌هاي این بخش، مقدار K_o با معکوس مقدار فشار اعمال گاز رابطه‌اي کاملا خطي دارد. در شکل‌هاي (۵) الي (۸) این رابطه نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، محور افقي معکوس مقدار فشارهاي اعمالي (۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۸ bar) و محور عمودي ضریب نفوذ پذیري به دست آمده از فشارهاي اعمال شده را نشان مي‌دهد. براي هر نمودار، از پنج نقطه به دست آمده خطي مستقیم برازش داده شده است. ضریب رگرسیون این خطوط بسیار نزدیک به ۱ مي‌باشد که نشان دهنده دقت بسیار زیاد این نتیجه گیري است. با مقایسه شیب این چهار نمودار به نظر مي‌رسد که حساسیت مقدار K_o نسبت به مقدار فشار اعمال شده در طرح‌هاي با نفوذ پذیري کمتر، کاهش مي یابد. به‌طوري که با افزایش مقدار دوده سیلیسي، تأثیر مقدار فشار بر میزان نفوذ پذیري در مقایسه با بتن معمولي بسیار کاهش مي‌یابد.



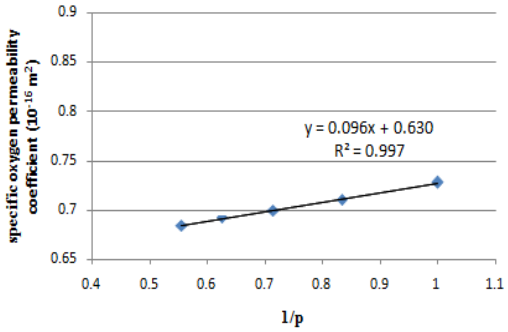
شکل۵: رابطه ضریب نفوذپذیري گاز اکسیژن و معکوس مقدار فشار اعمال شده (طرح شاهد).



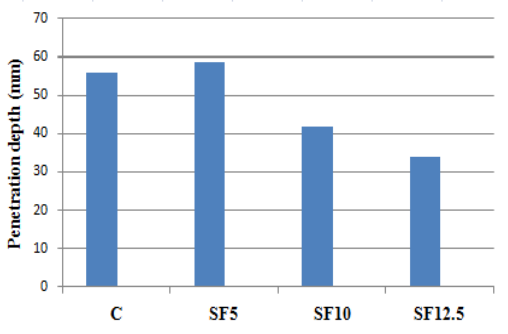
شکل۶: رابطه ضریب نفوذپذیري گاز اکسیژن و معکوس مقدار فشار اعمال شده (طرح **SF5**).



شکل۷: رابطه ضریب نفوذپذیري گاز اکسیژن و معکوس مقدار اعمال شده (طرح **SF10**).



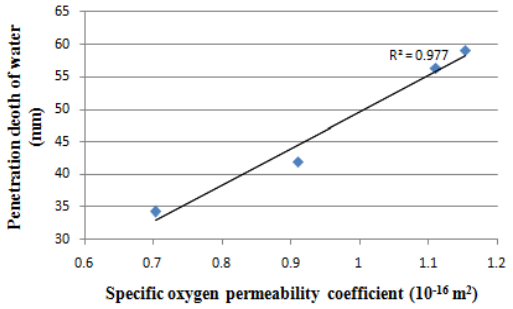
شکل۸: رابطه ضریب نفوذپذیري گاز اکسیژن و معکوس مقدار اعمال شده (طرح **SF12.5**).



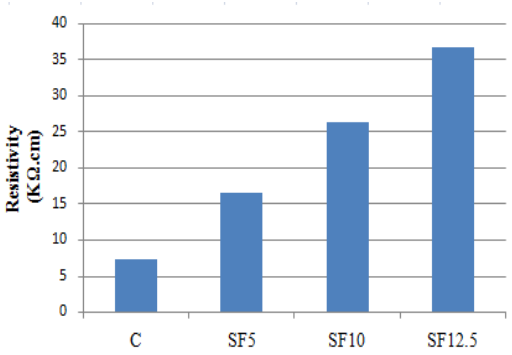
شکل۹: عمق نفوذ آب در بتن.

در نمودار شکل (۹) نتایج مربوط به عمق نفوذ آب مشخص شده است. با توجه به این نتایج مشخص مي‌گردد که با افزایش درصد جایگزیني دوده سیلیسي نفوذ پذیري بتن در مقابل آب کاهش یافته است. البته باید توجه داشت که نفوذپذیري طرح SF5 اندکي بیشتر نسبت به طرح شاهد بوده است. علت آنکه میزان نفوذپذیري طرح SF5 از بتن شاهد بیشتر شده است به علت آن است که در استفاده از پوزولان‌ها بایست به این نکته توجه نمود که از درصد بهینه استفاده نمود در غیر این صورت یا طرح اختلاط اقتصادي نخواهد بود و یا تأثیر مفید آن در بتن کاهش مي‌یابد و یا مثل اینجا اثر عکس خواهد داشت.

در نمودار شکل (۱۰) ارتباط بین متوسط نتایج به دست آمده از آزمایش‌هاي نفوذ پذيري در مقابل اکسیژن در فشارهاي مختلف و عمق نفوذ آب نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است نتایج این دو آزمایش همبستگي بسیار زیادي با یکدیگر دارند. این موضوع نشان مي‌دهد که آزمایش نفوذ پذيري در مقابل اکسیژن مي‌تواند تخميني با دقت مناسب براي نفوذ پذيري در مقابل آب به دست دهد. نتایج مربوط به مقاومت الکتریکي بتن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این نتایج نشان مي‌دهد که با افزایش جایگزیني دوده سیلیسي، مقاومت الکتریکي بتن به مقدار زیادي افزایش یافته است. مقاومت الکتریکي بتن تابعي از میزان تخلخل و ارتباط منافذ موئینه و غلظت یون‌هاي موجود در محلول منفذي مي‌باشد [۶]. از آنجا که نفوذ پذيري بتن نیز تابعي از تخلخل و ارتباط منافذ موئینه مي‌باشد [۱۰]، اندازه‌گیري مقاومت الکتریکي بتن مي‌تواند روشي غیر مستقیم براي ارزیابي نفوذپذيري باشد. با توجه به نتایج، همبستگي زیادي بین نتایج نفوذپذيري گاز و مقاومت الکتریکي مشاهده نشد. به نظر مي‌رسد که دوده سیلیسي علاوه بر بهبود ریزساختار، با کاهش غلظت یون‌هاي موجود در محلول منفذي به دلیل واکنش با $Ca(OH)_2$ ناشي از هیدراتاسیون سیمان (واکنش پوزولاني) سبب افزایش مقاومت الکتریکي بتن شده است. مي‌توان استنباط کرد که عدم همخواني کامل نتایج نفوذپذيري اکسیژن و مقاومت الکتریکي به این دلیل است که دوده سیلیسي با کاهش غلظت یون‌هاي موجود در محلول منفذي تاثیر بهبود دهنده بیشتري در مقاومت الکتریکي نسبت به نفوذ پذيري دارد.



شکل ۱۰: رابطه ضریب نفوذپذيري اکسیژن و عمق نفوذ آب در بتن.



شکل ۱۱: مقاومت الکتریکي ویژه بتن.

نتیجه گیري

در این مقاله اندازه گیري نفوذپذيري بتن در مقابل گاز اکسیژن به روش Cembureau مورد بررسي قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱- مقادیر به‌دست آمده براي نفوذ پذيري بتن در مقابل گاز اکسیژن به مقدار فشار اعمال شده این گاز بستگي دارد. با افزایش فشار، ضریب نفوذپذيري گاز اکسیژن کاهش پیدا مي‌کند.

۲- ضریب نفوذپذيري اکسیژن با معکوس مقدار فشار اعمال شده رابطه خطي دارد.

۳- در بتن‌هاي با نفوذ پذيري کمتر حساسیت نتایج آزمایش به فشارهاي اعمال شده کم مي‌شود.

۴-استانداردسازي فشارهاي اعمال شده براي تسهیل در تفسیر نتایج تحقیقات مختلف، مفید به نظر مي‌رسد.

۵- نتایج به دست آمده براي نفوذ پذيري گاز اکسیژن با نتایج آزمایش تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار همبستگي زیادي دارد. درحالي که، همبستگي مناسبي بین نتایج نفوذپذيري گاز و مقاومت الکتریکي مشاهده نشد.

مراجع

1- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete –Microstructure, Properties and Materials*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.

2 - Maage, M. (2001). "The effect of silica fume on corrosion of steel reinforcement – a Review." *Proc. 7th Int. Conf. on fly Ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, V. M. Malhortra, ed., American Concrete Institute, Madras, India, PP. 477-497.

3- RILEM TC 116-PCD (1999). "Concrete Durability- An approach toward performance testing." *Materials & Structures,* Vol. 32, PP. 163 – 173.

4 - Kollek, J. J. (1989). "The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method – a recommendation." ASCE, *Materials and structures*, Vol. 22, PP. 225-230.

5- Verdier, J., Carcasses, M. and Ollivier, J. P. (2002). *Modelling of a gas flow measurement: Application to nuclear containment vessels*, Elsevier, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 8, PP. 1331-1340.

6 - Whiting, D. A. and Nagi, M. A. (2003). *Electrical resistivity of concrete – a literature review,* report serial No. 2457, Portland Cement Association.

7 - Alexander, M. G. and Magee B. J. "Durabilty performance of concrete containing condensed silica fume." *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, PP. 917-922.

8 - Torrent, R. (1999). *The gas-permeability of high-performance concretes- site and laboratory test*. 2nd Int. Conf. on High-performance concrete and performance and quality of concrete structures, V. M. Malhortra, ed., American Concrete Institute, Gramado, PP. 291-308.

9 - Shekarchi, M. Debicki, G. Clastres, P. and Billard, T. *Influence of silica fume on permeability of concrete to oxygen for temperatures up to 500°C*. 6th Int. CANMET/ACI International Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and

Natural Pozzolans in Concrete, V. M. Malhortra, ed., American Concrete Institute, Bangkok, Thailand, PP. 975-996.

10 - Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete.* 4th. Chapter 7, Ed. Pitman Publishing INC, Massachusetts.