تحقیقات بتن
سال هفتم، شمارهٔ اوّل
بهار و تابستان ۹۳
ص۹۷- ۸۳
تاریخ دریافت: ۹۳/۷/ ۷
تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

بررسی خواص مهندسی بتن خود تراکم مورد استفاده درروسازی بتنی سطوح پروازی

پرهام حیاتی*
دانشجوی دکتری مهندسی راه و ترابری دانشگاه علم و صنعت ایران
حسن زیاری
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
جعفر سبحانی
استادیار بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

چکیده
ارتقاء خواص عملکردی و پایایی روسازی‌های بتنی سطوح پروازی اهمیت ویژه‌ای در تامین الزامات عملیاتی و ایمنی دارد. در این مقاله، مخلوط‌های بتن خودتراکم مورد استفاده در روسازی های بتنی مورد بررسی قرار گرفته اند. به منظور تعیین میزان کارآمدی بتن خود تراکم مورد استفاده در روسازی سطوح پروازی در سه وضعیت (۱) تغییر میزان نسبت آب به سیمان، (۲) میزان ماده سیمانی و (۳) تأثیر ماده هوازا، یک سری از آزمایش‌های تعیین خواص رئولوژیکی، مکانیکی و دوام برای طرح های مخلوط بتن خودتراکم با و بدون ماده افزودنی هوازا در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد عامل تعیین‌کننده در تامین دوام بتن های خود تراکم در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن عامل ماده افزودنی هوازاست. ضمن آنکه با کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین تغییر در میزان ماده سیمانی می توان تا حدودی این هدف را تامین کرد.

واژگان کلیدی: **بتن خود تراکم، عمل یخ زدن-آب شدن، خواص مکانیکی، ماده افزودنی هوازا، روسازی‌های بتنی فرودگاهی.**

*نویسنده مسئول: hayati@iust.ac.ir

۱- مقدمه

حمل و نقل هوایی به عنوان یکی از روش‌های برتر در زمینه جابجایی مسافر، بار و نیازمندی های امنیتی مطرح است. زمان توقف بهره‌برداری جهت بهسازی و بازسازی سطوح پروازی بتنی ضعیف و مضمحل تأثیر بسزایی در اقتصاد خرد وکلان منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای خواهد داشت. پس لزوم کاربرد روسازی‌های با کیفیت عملکردی بالا مهم است . انواع مختلفی از روسازی ها شامل روسازی‌های انعطاف‌پذیر(آسفالت گرم، آسفالت نیمه گرم و ...)، روسازی های صلب (انواع روسازی های بتنی)، روسازی‌های ترکیبی (انعطاف پذیر و صلب) و مخلوط‌های بازیافتی (سرد و گرم) می‌تواند برای کاربرد در سطوح پروازی مورد استفاده قرار گیرد. مخلوط‌های آسفالتی انعطاف‌پذیر در شرایط تماس با سوخت و روغن هیدرولیک هواپیما، شرایط یخ‌بندان- ذوب‌یخ دچار جداشدگی فیلم قیر از مصالح سنگی و در نتیجه آن بروز صدمه ناشی از ورود شیء خارجی[4] به موتور هواپیما می گردند که موجب از بین رفتن کامل موتور هواپیما و اضمحلال روسازی می گردد. بنابراین روسازی‌های صلب می‌توانند گزینه مناسبی برای کاربرد در این نوع سطوح باشند [۱]. طبق دستورالعمل مدیریت روسازی سطوح پروازی فرودگاه‌ها، ۱۵ نوع خرابی در تعیین شاخص خدمت دهی روسازی بتنی مؤثر است که ۶۰ درصد آن‌ها ناشی از مسئله دوام است[۲]. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثردر دوام بتن، مقاومت آن در برابر شرایط یخ زدن - آب شدن است که می‌تواند به تنهایی علت بروز ۶۷ درصد خرابی‌های منشاء دوام در روسازی‌های بتنی سطوح پروازی گردد. عمل یخ زدن از مهم‌ترین مسائل پایایی سازه‌های بتنی در شرایط آب و هوایی سرد است. زوال و خرابی مصالح پایه سیمانی در برابر شرایط چرخه‌های یخ زدن- آب شدن به هیدرولیک و فشار اسمزی نسبت داده می‌شود [۳-۵]. آب خالص در دمای صفر درجه سانتی گراد تحت فشار اتمسفر نرمال یخ می زند. در این هنگام، جهت تبدیل شدن به یخ در آب به میزان ۹ درصد افزایش حجم ایجاد می‌شود، اگرچه آبی که در محدوده حفره‌های موئینه داخل بتن محبوس شده است الزاماً در دمای صفر درجه سانتی گراد یخ نمی زند. دمایی که در آن آب در فضاهای موئینه یخ می‌زند تابعی از اندازه فضاهای خالی و منفذهای شیمیایی است[۶-۷]. همان طور که آب در منافذ موئینه یخ می‌زند، یخ شکل گرفته، آب درون حفره‌ای یخ نزده را فشرده می‌سازد. اگر آب بتواند به فضای اشغال نشده راه یابد، فشار هیدرولیکی آزاد می‌شود. هر چند اگر فاصله تا فضای خالی خیلی زیاد باشد و فشار هیدرولیکی توانایی آزادسازی را پیدا نکند، فشار آب، منافذ را توسعه خواهد داد که این موضوع باعث ایجاد تنش‌های کششی در محدوده خمیر بتنی خواهد شد. در بتن اشباع، تنش‌های کششی ممکن است سرانجام از ظرفیت کششی خمیر بیشتر گردیده و ترک‌خوردگی در بتن اتفاق بیفتد. تقریباً تمامی نظریه‌ها [۴-۵ و ۸-۹]، بر این‌که تکرار چرخه‌های یخ زدن- آب شدن باعث بروز ترک‌های داخلی در چسبنده سیمانی گردیده که این ترک با هر چرخه یخ‌زدگی رشد بزرگتری داشته و متعاقب آن در دوره های آب شدن از آب پر شده و در پی آن روند اضمحلال بتن سرعت بیشتری پیدا می کند، توافق نظر دارد. عوامل دیگر مؤثر بر مقاومت بتن در برابر عمل یخ‌زدگی شامل درجه اشباع بتن، کیفیت سنگ دانه‌ها، نسبت آب به مواد سیمانی و وضعیت عمل‌آوری بتن است[۳ و ۹]. برای بهبود مقاومت یخ زدگی بتن‌های دارای مقاومت معمولی، ماده افزودنی هوا زا به مخلوط بتن اضافه می گردد. در حین این که حباب هوای اجباری مقاومت در برابر یخ زدگی را افزایش می‌دهد، همچنین اغلب باعث کاهش مقاومت بتن نیز می گردد. نقش حباب هوای اجباری در بهبود مقاومت بتن در عمل یخ زدگی به خوبی توسط آیین نامه های بین المللی تایید و پیشنهاد شده است [۳]. هم اکنون نیازمندی به حباب هوای اجباری در بتن‌های توانمند به عنوان یک موضوع قابل بحث مطرح است [۱۰]. به این دلیل هوای اجباری به طور عادی در بتن‌های توانمند به کار نرفته است و محققین نیاز به استفاده از این ماده در بتن های توانمند را زیر سوال برده‌اند[۶ و۱۳-۱۱]. بسیاری از این محققین به این نتیجه رسیده‌اند که نفوذپذیری پایین بتن‌های توانمند به دلیل کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت یخ زدگی بتن را بهبود می-بخشد [۱۴-۱۵، ۱۱و۶]. بنابراین، اغلب محققین مقاومت یخ زدگی مخلوط‌های بتنی توانمند بدون استفاده از حباب هوا را گسترش داده‌اند[۶، ۱۱-۱۲و۱۶]. با وجود این شاخص ها، اغلب

[4] FOD- foreign object damage

محققین هنوز استفاده از مواد حباب هوا زا را پیشنهاد می‌کنند[۶، ۱۱،۱۳، ۱۷ و۱۸].

بتن خود تراکم به عنوان یکی از زیرمجموعه های بتن های توانمند با خصوصیات رفتارشناسی و کارپذیری متفاوت از بتن های معمولی می‌تواند گزینه مناسبی به منظور استفاده در این سطوح به منظور ارتقاء خواص عملکردی- پایایی روسازی‌های بتنی باشد. بتن خود تراکم یکی از انواع بتن‌های با کارایی بالا است که می تواند بدون عمل ویبره تحت وزن خود جریان یابد [۲]. با توجه به اینکه در دال‌های بتنی فرودگاهی نیاز به جریان‌پذیری بالای بتن می‌باشد کاربرد این نوع بتن که دارای محدوده جریان اسلامپ بالا است می‌تواند کارگشا باشد. با توجه به تفاوت اجزاء بتن خود تراکم با اجزاء بتن معمولی که این تفاوت در کاربرد مواد سیمانی، استفاده از پودر سنگ به منظور ماده اصلاح کننده ویسکوزیته با حضور دیگر مواد افزودنی به ویژه ماده فوق کاهنده آب بروز می‌یابد، خواص بتن تازه و مشخصات رئولوژی آن می تواند متفاوت از بتن معمولی باشد، اما به هر نحو هردوی بتن معمولی و خودتراکم در صورتی‌که برای درجات مقاومتی مشابه به کار روند، خواص مکانیکی مشابهی را نشان خواهند داد. بنابراین باتوجه به تفاوت تکنیک‌های طرح اختلاط، بتن‌ریزی و تراکم، پایایی بتن خود تراکم نسبت به بتن معمولی ممکن است متفاوت باشد و بنابراین نیاز به تحقیق در این حوزه می‌باشد [۳]. استانداردها و آیین‌نامه‌های موسسات معتبر مرتبط با روسازی بتنی فرودگاه‌ها تعدد زیادی دارد که می‌توان به طور قطع عنوان نمود که از میان آن‌ها آئین نامه سازمان هوانوردی آمریکا دارای جامعیت و مرجعیت جهانی است. در این آئین نامه علاوه بر توصیه‌هایی در مورد کیفیت مواد، الزاماتی برای معیارهای طراحی و اجرای طرح اختلاط بتن نیز ارائه شده است؛ بتن باید برای رسیدن به حداقل مقاومت خمشی ۲۸ روزه بیش از معیار قابل‌قبول که برای روسازی فرودگاه حداقل ۴/۱ مگاپاسکال است، طراحی شود، ضمن اینکه مبنای طراحی روسازی‌های بتنی مقاومت خمشی ۹۰ روزه است. مقاومت فشاری مجاز می‌بایست حداقل ۳۰ مگاپاسکال باشد. همچنین میزان حداقل عیار سیمان مورد نیاز در روسازی‌های بتنی سطوح پروازی طبق این آیین‌نامه در شرایط عادی تابعی از حداکثر اندازه مصالح سنگی است که با توجه به اینکه مقدار آن در این تحقیق ۱۹ میلی‌متراست، حداقل مجاز عیار سیمان می‌بایست ۳۲۰ لحاظ گردد. البته در حالت قرارگیری در شرایط یخ زدن – آب‌شدن می‌بایست عیار ۳۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب منظور گردد. محدوده مجاز نسبت آب به مواد سیمانی نیز باید بین ۰/۴ تا ۰/۵ لحاظ گردد که نسبت مطلوب آئین نامه در این خصوص مقدار ۰/۴ است [۱۹]. با توجه به نتیجه تحقیقات انجام گرفته در ارتباط با ارتقا وضعیت دوام بتن خودتراکم در برابر شرایط یخبندان، یکی از راه کارها در این خصوص کاهش نسبت آب به سیمان به میزان کمینه ۰/۳۶ بوده است. بنابراین روندکاهشی نسبت آب به سیمان از میزان ۰/۴ تا ۰/۳۶ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

در این تحقیق از مصالح سنگی شن و ماسه هر کدام در دو نوع درشت دانه و ریزدانه، سیمان پرتلند نوع ۲ تهران، پودر سنگ آهک، همچنین از فوق‌روان‌کننده و ماده افزودنی هوازا استفاده شده است. انتخاب محدوده منحنی مخلوط سنگ‌دانه بتن خود تراکم مطابق روش ملی طرح مخلوط بتن ایران بر اساس محدودیت‌های مرتبط با شرایط کاربری بر اساس رابطهٔ فولر - تامسون اصلاح شده و با در نظر گرفتن میزان پارامتر n به میزان ۰/۲۵ با حدکثر اندازه مصالح سنگی به میزان ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور تأمین دانه‌بندی مورد نظر آئین نامه، شن مصرفی به صورت نیمه شکسته و از معادن جنوب غرب تهران در دو نوع بادامی و نخودی و ماسه از نوع گرد گوشه و در دو نوع ماسه ۵-۰ میلی‌متر و عبوری از الک شماره ۸ تأمین شده است. خصوصیات مصالح سنگی در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است.خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

در این تحقیق برای رسیدن به جریان اسلامپ هدف، از فوق‌روان‌کننده نسل سوم بر پایه پلی کربوکسیلات های اصلاح شده استفاده شد. این مایع سبز رنگ دارای وزن مخصوص ۱/۱± ۰/۰۲ است. همچنین از مایع آنیونی زرد رنگ با PH به مقدار ۱± ۸/۵ با وزن مخصوص ۰/۰۲ ± ۱/۰۱ به عنوان ماده افزودنی هوازا برای رسیدن به میزان هوای مورد نیاز طرح مخلوط

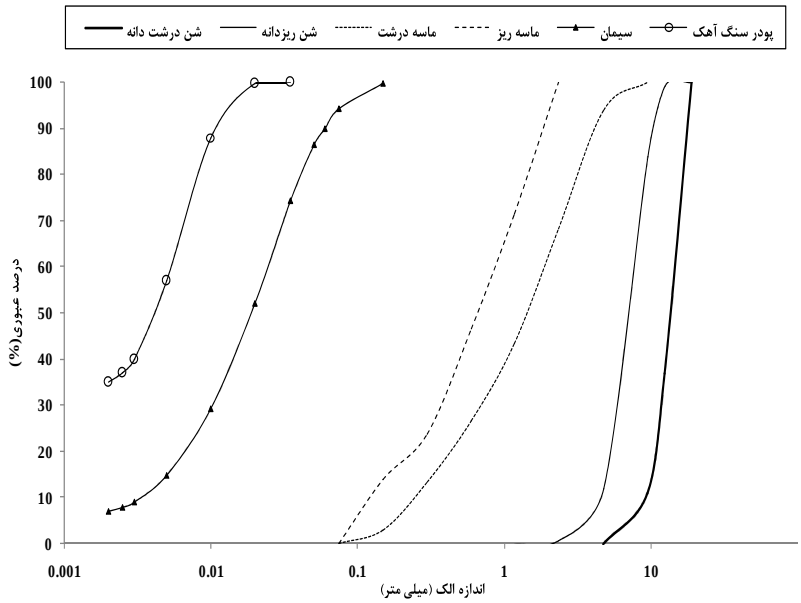
در شرایط سخت یخ زدگی برابر با ۱± ۶ درصد استفاده شده است.

۲-۲- نسبت‌های مخلوط

شش طرح مخلوط بتن خودتراکم با نسبت های مختلف آب به سیمان، میزان متغیر سیمان و کاربرد مواد افزودنی شیمیایی هوازا در نظر گرفته شده است. میزان حجم خمیر کل طرح‌های مخلوط در بازه ۳۵۰ تا ۴۲۰ لیتر بر مترمکعب قرار گرفته شده است. میزان سیمان کل برای کلیه طرح مخلوط‌ها به منظور تأمین حجم بالایی از مصالح ریزدانه (حجم خمیری به میزان ۳۵۰ تا ۴۰۰ لیتر بر مترمکعب) هماهنگ با آیین‌نامه‌های معمول با طرح اختلاط بتن خود تراکم در نظر گرفته شد [۲۰]. میزان نسبت ماسه به کل مصالح سنگی برای کلیه طرح‌های اختلاط به منظور حفظ پایداری برابر ۶۱ درصد در نظر گرفته شده است. نسبت‌های مخلوط در هر مترمکعب در جدول ۳ ارائه شده است. روند تولید متفاوتی برای (الف) طرح‌های عادی و (ب) طرح مخلوط هوادار شده در نظر گرفته شده است. در روند (الف)، مصالح سنگی درشت دانه و ریزدانه با یک سوم آب طرح اختلاط درون مخلوط کن، مخلوط شدند. در ادامه سیمان و پودر سنگ آهک به مخلوط کن اضافه شد. سپس مخلوط آب باقی مانده - فوق‌روان‌کننده به میکسر اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه با هم مخلوط شدند. برای روند (ب) ماده افزودنی هوازا پس از اختلاط با مصالح سنگی و ترکیب با سیمان و پودر سنگ آهک و ماده افزودنی فوق‌روان‌کننده به همراه آب به مدت تقریبی ۳ دقیقه در مخلوط کن ترکیب و در نهایت بتن خودتراکم هوادارشده تولید گردید.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی کاربردی

مشخصات	شن بادامی	شن نخودی	ماسه طبیعی	ماسه ریز
وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (gr/cm^3)	۲/۵۴	۲/۵۳	۲/۵۹	۲/۶۴
ظرفیت جذب آب(٪)	۱/۹	۲/۲	۲/۹	۳/۱۶
عبوری از الک ۲۰۰(٪)	۰/۳	۰/۴	۴/۵۶	۱۳/۹



شکل ۱- نمودار دانه بندی مصالح سنگی و مواد سیمانی

جدول ۲- خواص سیمان و پودر سنگ آهک

ترکیب شیمیایی (%)/ خواص	سیمان	پودر سنگ آهک
SiO_2	۲۲/۵۸	۰/۷۶
Al_2O_3	۴/۴۵	۱/۴
Fe_2O_3	۴	-
MgO	۳/۰۵	۱۲
K_2O	۰/۴	-
SO_3	۱/۷۱	۲/۲۷
CaO	۶۱/۶۸	۴۲
Na_2O	۰/۴۸	-
قلیایی معادل (٪) $(Na_2O + 0.658\ K_2O)$	۰/۷۴	-
افت سرخ شدن (%)	۱/۰۷	۴۰/۹۴
سطح ویژه (cm^2/g)	۲۸۰۵	-
وزن مخصوص (g/cm^3)	۳/۱۵	۲/۶
مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۲۶/۲	-
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۳۸/۴	-
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۶۴	-
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۲۴۵	-

جدول ۳- طرح‌های مخلوط بتن خود تراکم در هر مترمکعب بتن

طرح	نسبت آب به سیمان	مقدار (کیلوگرم بر مترمکعب)						فوق‌روان‌کننده	ماده افزودنی هوازا
		سیمان	پودر سنگ آهک	شن	ماسه درشت	ماسه ریز	حجم خمیر	درصد وزنی سیمان	
SP-LW	۰/۳۶	۴۰۰	۱۸۰	۶۴۹	۶۲۲	۳۸۰	۳۶۰	۰/۵۲	–
SP-MW	۰/۳۸	۴۰۰	۱۸۰	۶۳۹	۶۱۲	۳۷۴	۳۷۰	۰/۴۶	–
SP-R	۰/۴۰	۴۰۰	۱۸۰	۶۲۹	۶۰۲	۳۶۸	۳۸۰	۰/۴۱	–
SP-LC	۰/۴۰	۳۷۰	۱۸۰	۶۵۹	۶۳۱	۳۸۶	۳۵۰	۰/۴۹	–
SP-UC	۰/۴۰	۴۳۰	۱۸۰	۶۰۸	۵۸۳	۳۵۶	۴۰۰	۰/۳۸	–
A-SP-R	۰/۴۰	۴۰۰	۸۶	۵۸۸	۵۶۳	۳۴۵	۴۲۰	۰/۳۸	۰/۱۲

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های رئولوژی بتن تازه خود تراکم

طرح	جریان اسلامپ (میلی‌متر)	T_{500} (ثانیه)	حلقه J (میلی‌متر)	قیف V (ثانیه)	جعبه L	جعبه U (میلی‌متر)	میزان هوا	وزن مخصوص
محدوده *EFNARC*	۶۵۰-۸۰۰	۲-۵	۰-۱۰	۶-۱۲	۰/۸-۱	۰-۳۰		
SP-LW	۶۸۰	۴/۸۵	۵	۱۱/۴	۰/۸۸	۲۰	۱/۸	۲/۳۵۰
SP-MW	۶۹۰	۴/۸۱	۵	۸/۱۳	۰/۸	۱۱	۱/۹	۲/۳۲۲
SP-R	۷۲۰	۳/۱۹	۵	۸/۷۵	۰/۸	۲۰	۲/۷	۲/۳۲۳
SP-LC	۷۰۰	۳/۲۸	۷/۵	۹	۰/۸۲	۱۵	۱/۴	۲/۳۵۰
SP-UC	۷۴۰	۳	۵	۶/۴۴	۰/۸۴	۱۵	۱	۲/۳۴۲
A-SP-R	۷۲۰	۲	۵	۵/۳۰	۰/۸۲	۱۵	۶	۲/۱۶۲

۳-۲- آزمایش‌ها

۳-۲-۱- خواص کارپذیری

برای تعیین خواص کارپذیری طرح های مخلوط بتن تازه خودتراکم، آزمایش‌های کارایی بتن خودتراکم تازه شامل جریان اسلامپ، زمان رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر، قیف V شکل، جعبه L شکل و جعبه U شکل مطابق دستورالعمل PCI [۲۱] انجام شده است. همچنین آزمایش وزن مخصوص بتن تازه مطابق استاندارد ASTM C138 [۲۲] و آزمایش تعیین میزان هوا به روش فشاری مطابق استاندارد ASTM C 231 [۲۳] انجام شده است.

۳-۲-۲- خواص بتن سخت شده

۳-۲-۲- ۱- خواص مکانیکی

مقاومت فشاری، خمشی، ضربه و سایش مطابق استاندارد BS1881 BS1881-116 [۲۴]، ASTM C78-02 [۲۵]، method ACI 544 [۲۶] و BS EN 1338 [۲۷] به ترتیب انجام شده است. همه آزمایش‌های مذکور در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده اند. علاوه بر این آزمایش مقاومت فشاری در سن ۷ روزه نیز انجام شده است.

۳-۲-۲- ۲- خواص دوام

آزمایش نفوذ پذیری نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری بتنی مطابق استاندارد EN 12390-8 [۲۸] در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده است. آزمایش جذب حجمی نمونه‌های بتنی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری نیز مطابق روش استاندارد BS 1881-122 [۲۹] در ۳۰ دقیقه و ۲۴ ساعت انجام شده است. هر دوی این آزمایش‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شده اند.

برای ارزیابی مقاومت بتن تحت شرایط یخ زدن - آب شدن سریع، از متداول ترین آزمایش مطابق با پروسه A استاندارد ASTM C-666 به کار گرفته شده است[۳۰].

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱-خواص کارایی طرح های مخلوط بتن خودتراکم

جدول شماره ۴ نتایج آزمایش‌های کارایی طرح‌های مخلوط را نشان می دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به اینکه در دال‌های بتنی فرودگاهی نیاز به محدوده جریان اسلامپ بالا برای بتن خودتراکم می باشد، با تغییر در میزان ماده فوق‌روان‌کننده مطابق جدول شماره ۳ مقدار جریان اسلامپ هدف برای همه طرح‌های مخلوط تامین شده است. همان‌طور که از جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود، حفظ این پارامتر از طریق ماده فوق‌روان‌کننده برای طرح‌های مخلوط با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان و میزان سیمان متفاوت بوده است. بدیهی است میزان مصرف ماده فوق‌روان‌کننده با کاهش یا افزایش میزان نسبت آب به سیمان، به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. ضمن آنکه با افزایش مقدار سیمان، میزان مصرف این ماده افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج جدول شماره ۴ نشان می‌دهد، افزودنی ماده شیمیایی هوازا

در طرح A-SP-R باعث بهبود پارامترهای کارایی نسبت به طرح شاهد(SP-R) گردیده است.

۳-۲- خواص بتن سخت شده

۳-۲- ۱- خواص مکانیکی

۳-۲- ۱-۱- مقاومت فشاری

حداقل مقاومت فشاری مجاز برای بتن‌های مورد استفاده در سطوح پروازی طبق اعلام سازمان هوانوردی فدرال آمریکا، ۳۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه است[۱۸-۱۹]. بر مبنای نتایج ارائه شده در جدول ۵، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی تمامی طرح‌های مخلوط دارای مقداری بالاتر از حد مجاز آیئن نامه ای می‌باشد. بیشترین میزان مقاومت فشاری مربوط به طرح SP-LW با مقدار ۴۶ مگاپاسکال می‌باشد. در ضمن افزودن ماده افزودنی هوازا باعث کاهش پارامترهای مقاومتی طرح شاهد گردیده است، که کمترین میزان مقاومت مربوط به طرح A-SP-R می‌باشد.

۳-۲- ۲-۱- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی ۲۸ روزه در طراحی روسازی‌های بتنی، پارامتر اصلی است. بتن باید برای رسیدن به حداقل مقاومت خمشی ۲۸ روزه بیش از معیار قابل‌قبول که برای روسازی فرودگاه که حداقل ۴/۱ مگا پاسکال است، طراحی شود. نتایج ارائه شده در جدول ۵ بیانگر این است که تمامی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق به جزء طرح مخلوط SP-LC دارای مقاومتی بیش از مقدار کمینه ذکر شده در آئین نامه می باشند. بیشترین مقدار مربوط به طرح‌های مخلوط SP-LW با میزان کمینه آب به سیمان می‌باشد. تاثیر عامل هوازا باعث کاهش مقدار پارامتر مقاومت خمشی گردیده، اما این مقدار با توجه درصد هوای کل طرح مخلوط در محدوده ۱±۶ درصد با حضور عامل هوازا حداکثر ۱۰ درصد بوده است.

۳-۲- ۳-۱- مقاومت ضربه‌ای

با توجه به نوع بارگذاری طرح در سطوح پروازی بتنی، لزوم ارزیابی بتن مورد استفاده در این نوع سطوح تحت شرایط ضربه به خصوص در محوطه نشست باند پرواز و همچنین محل توقفگاه هواپیماها ضرورت دارد. همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود نتایج آزمون ضربه ارتباط مناسبی با خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و خمشی دارد. نتایج ارائه شده در جدول ۵، بیانگر این است که تمامی طرح‌های مخلوط ساخته شده در این تحقیق به جزء طرح SP-LC دارای مقاومتی بیش از مقدار کمینه ذکر شده می باشند. بیشترین مقدار پارامتر مقاومت ضربه مربوط به طرح مخلوط SP-LW با میزان کمینه آب به مواد سیمانی می باشد. کمترین مقدار این پارامتر مربوط به طرح مخلوط هوازا (A-SP-R) با مقدار ۴۵۷ کیلو نیوتن - میلی‌متر می‌باشد. تاثیر عامل هوازا باعث کاهش مقدار ۲۳ درصدی این پارامتر نسبت به طرح شاهد(SP-R) شده است. بعد از این طرح مخلوط،کمترین مقدار مقاومت ضربه مربوط به طرح های مخلوط SP-LC و SP-UC با میزان تغییرات مثبت و منفی ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان نسبت به طرح شاهد(SP-R) می باشد. هیچ‌گونه الزامی در خصوص میزان پارامتر مقاومت ضربه‌ای بتن کاربردی در سطوح پروازی توسط استانداردها اعلام نشده است. از آنجایی که حداقل مقاومت خمشی مجاز برای کاربرد بتن در این نوع سطوح ۴/۱ مگاپاسکال و حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز ۳۰ مگاپاسکال است، می‌توان به‌طور تقریبی به یک عدد مناسب در وضعیت کاربرد مقدار متغیر سیمان و همچنین ماده افزودنی شیمیایی هوازا در بتن دست یافت.

۳-۲- ٤-۱- مقاومت سایشی

مقاومت سایشی یکی از پارامترهای مؤثر در روسازی‌های بتنی است. اگرچه می‌توان در مرحله اجرا نیز با در نظر گرفتن راهکارهایی نسبت به تامین این پارامتر اقدام نمود، لیکن لزوم توجه به این پارامتر در مرحله طرح اختلاط ضرورت دارد. با توجه به نتایج جدول ۵، همان‌طور که مشاهده می‌شود طرح مخلوط SP-LW با میزان آب به سیمان ۰/۳۶ دارای کمترین میزان عرض نوار سایش به میزان ۲۵/۳ میلیمتر و طرح مخلوط SP-UC با میزان سیمان بیشینه به مقدار ۴۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب دارای بیشترین میزان عرض نوار سایش به میزان ۲۷/۵ میلیمتر می‌باشد. محدوده تغییرات عرض نوار سایش در سن ۲۸ روزه بین ۲۵/۵ میلی‌متر تا ۲۷/۵ میلی‌متر در نوسان بوده است. در تمامی طرح‌های مخلوط میزان عرض نوار سایش در سن ۹۰ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه کاهش یافته است، که بیشترین میزان

کاهش عرض نوار مرتبط با طرح SP-LC به میزان ۱/۲ میلی‌متر بوده است.

۳-۲-۲- جذب آب حجمی ۳۰ دقیقه و ۲٤ ساعته

جدول ۶ نتایج جذب آب حجمی طرح های مخلوط ساخته شده در این تحقیق را نشان می دهد. همان‌طور که مشخص است کمترین میزان جذب مربوط به طرح مخلوط SP-LW با میزان آب به سیمان ۰/۳۶ و بیشترین مقدار مربوط به طرح مخلوط هوازا (A-SP-R) بوده است. این مطلب به دلیل زیاد بودن تخلخل در نمونهٔ طرح هوازا می‌باشد، در حالیکه کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث کاهش میزان جذب آب نمونه‌های بتن خودتراکم و متعاقب آن کاهش میزان تخلخل بتن گردیده است. نفوذ آب نیز از همین روند تبعیت کرده است. میزان پارامترهای جذب آب و نفوذ پذیری در سن ۹۰ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه کاهش وبهبود یافته است.

۳-۲- ۳- مقاومت در برابر یخ زدن – آب شدن

طبق استاندارد ASTM C666، آزمایش مقاومت در برابر یخ زدن- آب شدن را تا ۳۰۰ چرخه و یا تا مرحله‌ای که مدول الاستیسیته دینامیکی به میزان ۶۰ درصد مقدار اولیه خود کاهش یابد و البته هر کدام که زودتر فرا برسد، ادامه می دهند. همچنین همزمان با برداشت نتایج تغییرات مدول دینامیکی نسبی در این روش، تغییرات طول و وزن برای همه نمونه‌ها مورد ثبت و ارزیابی قرار گرفته است[۳۰]. کاهش در این مدول پس از تعداد چرخه‌های یخ زدن- آب شدن، بیانگر میزان صدمه دیدن بتن می باشد. با این روش می‌توان قبل از این‌که خسارت وارد بر بتن به وسیله عینی و یا هر روش دیگر مشاهده شود، به وجود آن پی برد. سپس دوام بتن را با پارامتر ضریب دوام طبق رابطهٔ زیر محاسبه می‌کنند .

$$\text{ضریب دوام} = \frac{(\text{تعداد چرخه در انتهای آزمایش}) * (\text{درصدی از مدول اولیه})}{۳۰۰}$$

مبنای اندازه‌گیری ۳۰۰ چرخه می بایست در منطقه کاربردی بر مبنای اطلاعات هواشناسی اصلاح گردد و واقعیت منطقه ای در این خصوص ملاک عمل قرار گیرد. شایان ذکر است هیچ گونه معیار تائیدشده‌ای برای رد یا قبول بتن، بر مبنای ضریب دوام وجود ندارد و لذا ارزش آن اساساً در مقایسه بتن‌های مختلف، ترجیحاً در مواردی‌که فقط یک متغیر مثلاًسنگدانه تغییر کند، کاربرد دارد. ضریب دوام کمتر از ۴۰، نشانگر این است که احتمالاً بتن از نظر مقاومت در برابر یخ زدگی مردود است، مابین ۴۰ تا ۶۰، دامنه بتن های با دامنه مشکوک و بیش از ۶۰، وضعیت بتن رضایت بخش را نشان می‌دهد.

جدول۵- نتایج آزمایش‌های مکانیکی

کد طرح	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)			مقاومت خمشی (مگا پاسکال)		مقاومت ضربه (کیلو نیوتن- میلی‌متر)		مقاومت سایشی (میلی‌متر)	
	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
SP-LW	۳۱/۲	۴۶/۰	۴۸/۸	۵/۲	۵/۹	۷۲۸	۱۲۰۲	۲۵/۵	۲۵
SP-MW	۳۰/۴	۴۲/۵	۴۶	۴/۹	۵/۸	۷۱۰	۱۱۴۲	۲۶	۲۵/۵
SP-R	۲۹/۹	۴۰/۶	۴۴/۳	۴/۸	۵/۶	۵۹۰	۱۰۵۶	۲۵/۵	۲۵
SP-LC	۲۵/۸	۳۵/۶	۳۸/۳	۳/۸	۵/۱	۵۴۶	۶۹۲	۲۷	۲۵/۸
SP-UC	۲۵/۴	۳۵/۰	۴۰/۲	۴/۹	۵/۵	۵۱۰	۶۱۹	۲۷/۵	۲۷
A-SP-R	۲۳/۲	۳۰/۱	۳۵/۶	۴/۳	۴/۵	۴۵۷	۹۷۱	۲۷	۲۶/۸

جدول۶- نتایج آزمایش‌های مکانیکی

کد طرح	جذب آب (٪)				نفوذ آب (میلی‌متر)	
	۲۸ روزه		۹۰ روزه		۲۸ روزه	۹۰ روزه
	۳۰ دقیقه	۲۴ ساعت	۳۰ دقیقه	۲۴ ساعت		
SP-LW	۱/۶۳	۵/۶۶	۱/۱۲	۴/۸۳	۱۵	۱۳/۷
SP-MW	۲/۰۹	۶/۱۴	۱/۵۳	۵/۵۵	۱۷	۱۷
SP-R	۲/۳۱	۶/۷۴	۱/۶۹	۵/۹۸	۱۶/۷	۱۶/۷
SP-LC	۲/۳۱	۶/۷۳	۱/۶۹	۵/۷۴	۲۲/۵	۱۷/۵
SP-UC	۱/۷۹	۶/۱۱	۱/۶۷	۵/۲۳	۲۰	۱۷/۳
A-SP-R	۲/۶۷	۷/۷	۲/۵۷	۷/۱۷	۲۰	۱۰

در این استاندارد علاوه بر تعیین روند تغییرات مدول دینامیکی نسبی(RE_d)، تغییرات وزن(M_c) و تغییرات طول (L_c) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. روند تغییرات طول، وزن و مدول دینامیکی نسبی طرح های مخلوط در شکل ۲، ارائه شده است. ضمن آن‌که در شکل ۳ وضعیت نمونه‌های طرح مخلوط پس از در معرض قرار گیری نمونه‌ها در چرخه‌های یخ زدن - آب شدن نشان داده شده است. بازرسی چشمی نمونه‌های طرح های مخلوط بتن خودتراکم از لحاظ بروز خرابی های محتمل از جمله پوسته شدن/ شن زدگی، ترک‌خوردگی، بیرون پریدگی و در نهایت پایداری ابعادی در جدول ۷ مورد بررسی قرار گرفته است. در این جدول ضریب دوام طرح های مخلوط نیز ازائه شده است. در خصوص بررسی وضعیت مقاومتی نمونه‌های بتنی در برابر شرایط یخ زدن - آب شدن، در سه وضعیت به بررسی طرح های مخلوط پرداخته می شود: (۱) نسبت آب به سیمان (۲) میزان مواد سیمانی (۳) تأثیر عامل هوازا.

(۱)نسبت آب به سیمان

در این وضعیت سه طرح مخلوط SP-LW، SP-MW و SP-R با نسبت آب به سیمان به ترتیب برابر ۰/۳۶، ۰/۳۸ و ۰/۴۰ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته اند. همان‌طور که از جدول ۷ مشاهده می شود کمترین ضریب دوام مرتبط با طرح شاهد (SP-R) با میزان بیشینه نسبت آب به سیمان می‌باشد. مقدار ضریب دوام برای این طرح مخلوط، بتن را در وضعیت مردود قرار داده است. با کاهش نسبت آب به سیمان، ضریب دوام طرح های مخلوط افزایش یافته است که بیشترین مقدار مربوط به طرح SP-LW با میزان ۶۵ بوده است که متعاقب آن بتن را در وضعیت رضایت بخش قرار داده است. در ارتباط با طرح مخلوط SP-MW ضریب دوام ۵۵ شده که بتن را در وضعیت مشکوک از لحاظ مقاومتی در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن قرار داده است. با توجه به نتایج جدول ۷، می توان استنباط نمود که هر کاهش ۰/۰۲ درصدی نسبت آب به سیمان، سبب بهبود یک سطحی وضعیت مقاومتی طرح مخلوط در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن گردیده است و بتن در وضعیت مردود با نسبت آب به سیمان ۰/۴ به وضعیت رضایت بخش در طرح مخلوط با کمینه نسبت آب به سیمان رسیده است. بنابراین عامل نسبت آب به سیمان را می توان یکی از عوامل مؤثر درارتقاء میزان مقاومت در برابر چرخه‌های یخ زدن- آب‌شدن در نظر گرفت.

وضعیت ظاهری نمونه‌ها پس از اتمام آزمایش یخ‌بندان مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. بدترین وضعیت ظاهری مرتبط با طرح SP-R بوده است. خرابی پوسته شدن، ترک‌خوردگی در وضعیت شدید و همچنین بیرون پریدگی به صورت خفیف در این طرح بروز یافته است که در نهایت این نوع خرابی ها منجر به ناپایداری ابعادی نمونه‌ها گردیده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است مقاومت طرح شاهد نصف ظرفیت مجاز استاندارد بوده و در سیکل ۱۵۰م به مدول دینامیکی نسبی ۶۰ درصد رسیده است. مدول دینامیکی نسبی طرح SP-R (شاهد)

پس از گذشت ۲۴۰ چرخه به عدد صفر رسیده است که این موضوع را می توان ناشی از بروز ترک در فاصله ۷ سانتی متری وسط نمونه دانست. روند کاهشی مدول دینامیکی نسبی، نسبت مستقیم با اضمحلال نمونه بتنی دارد که در این خصوص از هم پاشیدگی نمونه بتن به وسیله ترک های ماکرو عرضی مبین این موضوع است. با کاهش نسبت آب به سیمان هیچ گونه ترک‌خوردگی و بیرون پریدگی حتی به صورت جزئی نیز در نمونه‌ها بروز پیدا نکرده است. مطابق شکل ۳ تنها خرابی بارز در این دو طرح مخلوط، پوسته شدن به صورت خفیف است که نسبت به طرح شاهد با میزان نسبت آب به سیمان ۰/۴ درصد، این نوع خرابی ۲ سطح کاهش یافته است. همان‌طور که از شکل ۲ مشاهده می شود، تغییرات طول طرح SP-R با میزان ۰/۲- درصد بیشترین میزان تغییرات را در این گروه طرح‌های مخلوط نشان می‌دهد. میزان تغییرات پارامترLC برای دو طرح دیگر در محدوده ۰/۰۵ ± درصد مهار شده است.

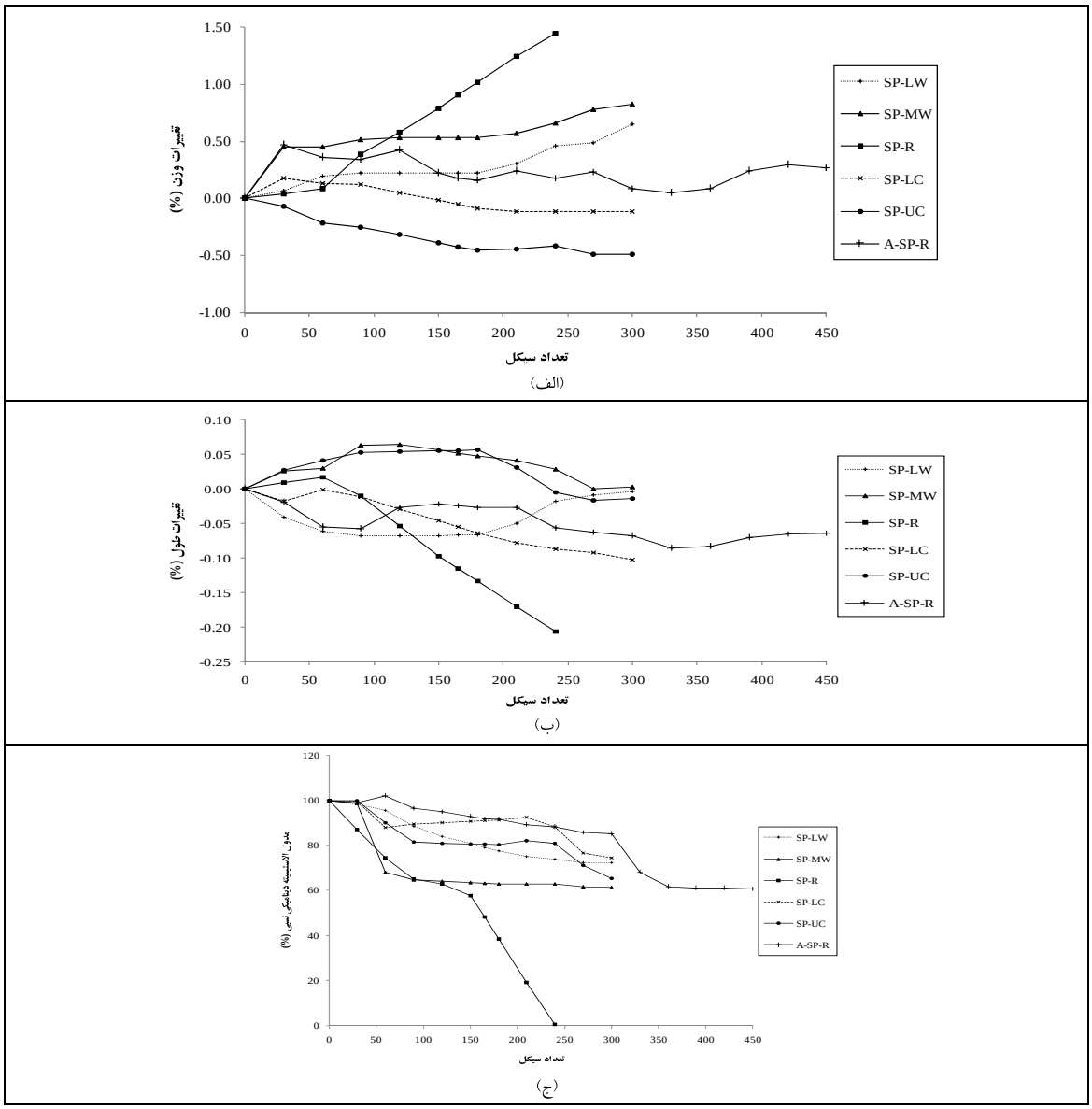
(۲) میزان سیمان

در این حالت سه طرح مخلوط SP-LC، SP-R و SP-UC با میزان سیمان به ترتیب برابر ۳۷۰، ۴۰۰ و ۴۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب در وضعیت نسبت آب به سیمان ثابت به مقدار ۰/۴ مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته اند. با توجه به جدول ۷، به جزء طرح مخلوط SP-R که از لحاظ مقاومت در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن در حالت مردود است بقیه طرح های مخلوط از نظر مقاومتی در محدوده رضایت بخش قرار گرفته اند. افزایش میزان سیمان از مقدار ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به مقدار ۴۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب سبب بهبود وضعیت ظاهری نمونه‌ها گردیده است. ضمن آن‌که هیچ‌گونه ترک‌خوردگی طولی یا عرضی نیز در نمونه‌ها مشاهده نشده است. تنها خرابی مشهود در این نوع طرح مخلوط پوسته شدن در سطح خفیف است که پایداری ابعادی نمونه‌ها نیز در این وضعیت حفظ شده است. با کاهش میزان ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعبی سیمان از مقدار طرح SP-R، ضمن ارتقاء ضریب دوام از مقدار ۲۹ به ۷۳، تنها خرابی پوسته شدن در وضعیت رو به رشد به همراه بیرون پریدگی در سطح خفیف بروز کرده است. می توان چنین نتیجه گرفت که اگر الزام تامین خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم مورد استفاده در دال‌های بتنی سطوح پروازی نبود، می توان به عنوان یک راهکار عامل کاهش میزان سیمان را به عنوان یک راهکار در بهبود خواص دوام بتن در نظر گرفت. ضمن آنکه آئین نامه سازمان هوانوردی فدرال ایالات متحده نیز مقداری در حدود حداقل ۳۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب را برای بتن های نرمال در سطوح پروازی که در معرض عمل یخ زدن - آب شدن قرار گرفته اند، پیشنهاد نموده است. در طرح مخلوط SP-LC شاهد کاهش پارامتر تغییرات طول به میزان حداقل ۰/۱ درصد، تغییرات وزن به مقدار ۱/۵ درصد (ثبات وزنی نمونه) هستیم. در این طرح مخلوط روند تغییرات مدول دینامیکی نسبی تغییرات کاهشی با شیب ملایم داشته است و پس از گذشت ۳۰۰ چرخه به مقدار ۷۳ درصد رسیده است.

(۳) تأثیر عامل هوازا

به منظور بررسی تأثیر ماده افزودنی هوازا به طرح شاهد(SP-R)، این ماده شیمیایی افزوده شده است. میزان افزودن ماده افزودنی هوازا تا مقداری است که مجموع درصد هوای اتفاقی و اجباری طرح SP-R با انجام آزمایش ASTM C 231 [۲۳] در محدوده ۱±۶ درصد قرار گیرد. این میزان هوا متناظر با در معرض قرارگرفتن روسازی بتنی در شرایط شدید یخ زدگی می‌باشد. بررسی طرح بتن خودتراکم هوازا تا چرخه ۴۵۰ ام ادامه یافته است تا روند تاثیر ماده هوازا به طور مناسب مشاهده و تحلیل گردد. بیشترین مقدار ضریب دوام طرح‌های مخلوط متعلق به طرح A-SP-R (طرح هوازا) می‌باشد، که این میزان رشد ناشی از عامل ماده افزودنی هوازا است که در بهبود خواص پایایی بتن در شرایط یخ زدن - آب شدن تأثیر مثبت گذاشته است. افزودن ماده هوازا به طرح شاهد، باعث ارتقای ضریب دوام به میزان ۱۹۳ درصد گردیده است. روند کاهش مدول دینامیکی نسبی این طرح از ۳۰۰ چرخه آغاز و پس از گذشت حدود ۴۷۰ چرخه با شیب ملایم کاهشی به مرز ۶۰ درصد رسیده است. در نتیجه افزودن ماده مضاف هوازا، تعداد چرخه لازم برای رسیدن به مدول دینامیکی نسبی ۶۰ درصد از ۱۵۰ چرخه در طرح SP-R به ۴۷۰ چرخه در طرح A-SP-R (طرح هوازا) افزایش یافته است که این میزان رشد ۳۲۰ چرخه‌ی تنها متاثر از افزودن عامل هوازا بوده است.

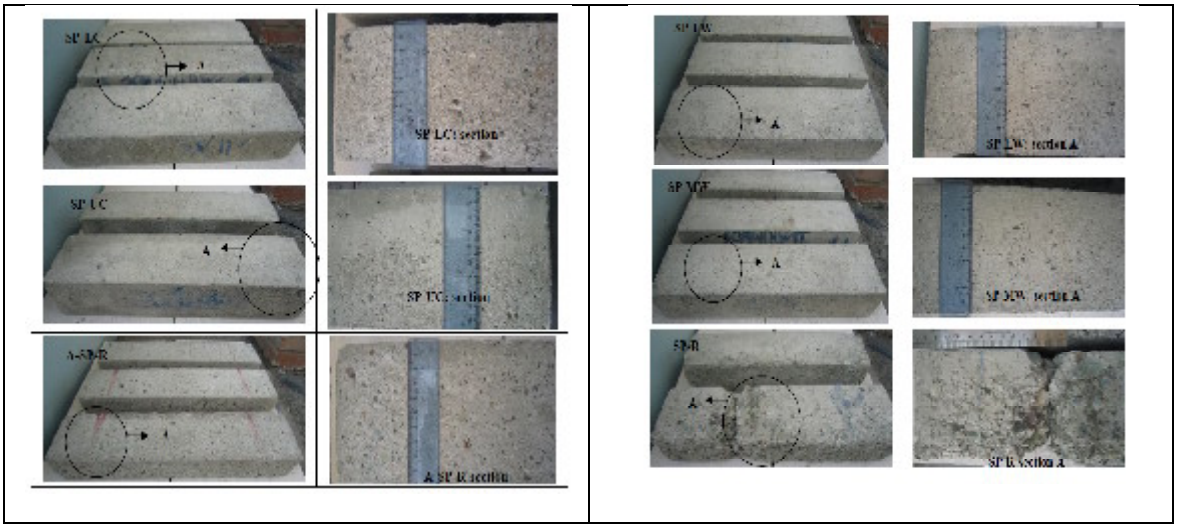
با توجه به بازرسی چشمی صورت گرفته از وضعیت ظاهری نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض عمل یخ زدن- آب شدن، مطابق با جدول ۷ و شکل ۳ مشاهده می شود طرح SP-R (طرح هوازا) ضمن دارا بودن بالاترین ضریب دوام با مقاومت تا میزان ۵۰۰ چرخه کماکان دارای پایداری ابعادی، عدم بروز ترک و پدیده جدا شدگی بوده است. تنها پوسته شدگی به مقدار متوسط در سطح نمونه‌های آن ایجاد شده که در مقایسه با طرح مخلوط شاهد هیچ گونه ترک‌خوردگی سطحی و داخلی عمیق، عدم پایداری در وضعیت شدید، بیرون پریدگی در لبه ها قابل مشاهده نیست و فقط بروز پدیده پوسته شدن با میزان یک سطح کاهش اتفاق افتاده است. در طرح مخلوط SP-R (طرح شاهد) با میزان تغییرات وزن ۱.۴۴ درصدی که ناشی از افت ۷۱ درصدی مدول دینامیکی نسبی و تغییرات طول ۰/۲ درصدی که ناشی از گسترش ترک های داخلی در فرآیند چرخه های یخ زدن - آب شدن است که در نهایت منجر به تخریب بتن و متعاقب آن کاهش وزن بالای نمونه در این طرح مخلوط گردیده است.



شکل ۲- (الف) تغییرات طول ، (ب) تغییرات وزن و(ج) تغییرات مدول دینامیکی نسبی طرح های مخلوط در برابر تعداد چرخه های یخ زدن – آب شدن

جدول ۷- ضرایب دوام و نتایج بازرسی چشمی طرح‌های مخلوط

طرح	ضریب دوام	بازرسی چشمی							
		پایداری ابعادی		پوسته شدن/ شن زدگی		ترک‌خوردگی		بیرون پریدگی	
		ناپایداری	شدت	وقوع خرابی	شدت	وقوع خرابی	شدت	وقوع خرابی	شدت
SP-LW	۶۵		–		خفیف		–		–
SP-MW	۵۵		–		خفیف		–		–
SP-R	۲۹		شدید		شدید		شدید		خفیف
SP-LC	۷۳		–		رو به رشد		–		خفیف
SP-UC	۶۴		–		خفیف		–		–
A-SP-R	۸۵		–		رو به رشد		–		–



شکل ۳- بازرسی چشمی نمونه‌های طرح های مخلوط

٤- نتیجه‌گیری

- با توجه به این‌که هیچ‌گونه الزامی در خصوص میزان پارامتر مقاومت ضربه‌ای و سایشی بتن کاربردی در سطوح پروازی توسط استانداردها اعلام نشده است، میتوان با در نظر گرفتن حداقل مقاومت خمشی و فشاری مجاز به طور تقریبی به یک عدد مناسب در وضعیت کاربرد مقدار متغیر نسبت آب به سیمان و همچنین کاربرد ماده افزودنی شیمیایی هوازا در بتن دست یافت.

- با توجه به یکسانی درجه اشباع، کیفیت سنگدانه ها، نسبت آب به مواد سیمانی و وضعیت عمل آوری بتن در تمامی طرح های مخلوط می توان اشاره داشت که عامل ماده افزودنی هوازا بیشترین تأثیر را در روند بهبود مقاومتی و وضعیت ظاهری نمونه‌های بتنی در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن نسب به بقیه گروه طرح داراست.

- طرح مخلوط بتن هوادارشده دارای پایداری ابعادی، عدم بروز ترک و پدیده جدا شدگی بوده و تنها پوسته شدگی به مقدار متوسط در سطح نمونه‌های آن پس از ۴۵۰ چرخه ایجاد شده است که در مقایسه با طرح مخلوط شاهد هیچ گونه ترک‌خوردگی سطحی و داخلی عمیق، عدم پایداری در وضعیت شدید، بیرون پریدگی در لبه‌ها در نمونه‌ها قابل مشاهده نیست و فقط بروز پدیده پوسته شدن با میزان یک سطح کاهش اتفاق افتاده است.

- در صورت عدم تامین مقادیر حداقلی پارامترهای مقاومتی، می‌توان به عنوان گزینه دوم از راهکار کاهش نسبت آب به سیمان تا مقدار ۰/۳۶ بهره برد.

- با کاهش نسبت آب به سیمان از مقدار ۰/۴، هیچ گونه ترک‌خوردگی و بیرون پریدگی حتی به صورت جزئی نیز در نمونه‌ها بروز پیدا نکرده است و تنها خرابی بارز پوسته شدن به صورت خفیف است که نسبت به طرح شاهد با میزان نسبت آب به سیمان ۰/۴ درصد، این نوع خرابی نیز ۲ سطح کاهش یافته است.

- اگر الزام تامین حداقل خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم مورد استفاده در دال‌های بتنی سطوح پروازی نبود، می توان به عنوان راهکار سوم، عامل کاهش میزان سیمان را به عنوان یک راهکار در بهبود خواص دوام بتن در نظر گرفت.

- ترکیب دو پارامتر تغییرات طول و مدول دینامیکی نسبی برای ارزیابی میزان ترک های داخلی و همچنین صدمه ناشی از عمل یخ زدن به کار می رود.

- معمولا" تغییرات وزن نمونه‌های بتنی بیشتر با خرابی‌های سطحی ناشی از پوسته شدن ارتباط بیشتری را نشان می دهد.

۵- منابع

[1]. Giussani, F, Mola, F. "Durable concrete pavements: The reconstruction of runway head 36R of Milano Linate International Airport", Constr Build Mater 2012;34:352-61.

[2]. Shahin, MY., "Pavement management for airports", roads, and parking lots. Second edition, Springer, 2005.

[3]. Powers, TC, "Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete", J ACI Proceedings 4(4):245–272, 1945

[4]. Powers, TC, "Freezing effects of concrete", ACI SP-47. American Concrete Institute, pp 1–11, 1975

[5]. Nehdi, ML, "Bassuoni ? MT. Durability of self-consolidating concrete to combined effects of sulphate attack and frost action", Mater Struct; 2008; 41:1657–79.

[6]. Micah Hale, W.,*, Seamus, F. Freyne, Bruce Russell, W., "Examining the frost resistance of high performance concrete" , J. Construction and Building Materials, Vol. 23 , 2009: 878–888 .

[7]. Mindess, S, Young, JF. Concrete. New JerseyEnglewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1981.

[8]. Litvan, GG, "Phase transitions of adsorbates, iv, mechanism of frost action in hardened cement paste", J Am Ceramic Soc 55(1):38–42, 1972

[9]. Detwiler, R, Dalgleish, B, Williamson, R "Assessing the durability of concrete in freezing and thawing", ACI Mater J 86(1):29–35, 1989

[10]. Bassuoni, MT, Nehdi, M "The case for air-entrainment in high performance concrete". ICE Struct Build 158(5):311–319, 2005

[11]. Cohen, MD, Zhou, Y, Dolch, WL. "Non-air-entrained high strength concrete—is itfrost resistant?" ACI Mater J;89(4):406–15,1992.

[12]. Pinto, RCA, Hover, KC. "Frost and scaling resistance of high-strength concrete", Research and development bulletin RD122. Portland Cement Association; 2001.

[13]. Aitcin, PC, Ballivy, G, Mitchell, D, Pigeon, M, Coulombe, LG. "The use of high performance air entrained concrete for the construction of the Portneuf bridge", ACI SP-140; p. 53–72.

[14]. Li Y, Ward MA, Langan BW. Freezing and thawing: comparison between nonair-entrained and air-entrained high strength concrete. ACI SP-149: 545–60.

[15]. Mokhtarzadeh, A, Kriesel, R, French, C, "Snyder M. Mechanical properties and durability of high-strength concrete for prestressed bridge girders", Transport Res Record;1478:20–9, 1995.

[16]. Zia, P , Hansen, MR. "Durability of high performance concrete.", In: Pacific Rim TransTech conference proceedings. American Society of Civil Engineers; 1993. p. 398–404.

[17]. Aitcin, PC, Ballivy, G, Mitchell, D, Pigeon, M, Coulombe, LG. "The use of high performance air entrained concrete for the construction of the Portneuf bridge", ACI SP-140; p. 53–72.

[18]. Innovative Pavement Research Foundation (IPRF) research report. Best Practices for Airport Portland Cement Concrete Pavement Construction (Rigid Airport Pavement). Report IPRF-01-G-002-1:2003.

[19]. Federal Aviation Administration (FAA). Airport Construction Standards. Part-6. Rigid pavement (AC 150/5370-10).

[20] .Aitcin, PC, Ballivy, G, Mitchell, D, Pigeon, M, Coulombe, LG. "The use of high performance air entrained concrete for the

construction of the Portneuf bridge". ACI SP-140; 1993:53–72.
[21]. PCI. Interim guidelines for the use of self-consolidating concrete in precast/prestressed concrete institute plants, (TR-6-03). Chicago, Il:Precast/Prestressed Concrete Institute, 2003.
[22]. ASTM C 138/C 138M . Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete American Society for Testing and Materials; 2001.
[23]. ASTM C 231. Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method. American Society for Testing and Materials; 2004.
[24]. BS 1881-116. British Standard. Testing concrete Method for determination of compressive strength of concrete cubes;1983.
[25] .ASTM C 78. Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading). American Society for Testing and Materials; 2002.
[26] .(ACI)-544.2R, ACI report on fiber reinforced concrete, American Concrete Institute, 1999.
[27]. BS EN 1338. Concrete paving blocks-Requirements and test methods. British Standard; 2003.
[28]. BSI (2009) BS EN 12390-8: 2012: Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure. BSI, London, UK.
[29]. BS 1881-122. British Standard. Testing concrete Method for determination of water absorption of concrete cubes;2011.
[30]. ASTM C666. Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing American Society for Testing and Materials; 2003.

.

Engineering Properties of SCC for Airfield Concrete Pavements

P. Hayati*
Ph.D. Student, Iran University of Science and Technology
H. Ziari
School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
J. Sobhani
Department of Concrete Technology; Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC)

(Received: 2014/9/29 - Accepted: 2015/4/29)

Abstract

Improvements on the performance and durability aspects of airfield concrete pavements are very crucial issue for operational and safety. In this regard, self consolidating concrete (SCC) mixtures proposed for this means and their engineering properties were assessed. The effects of (1) w/c ratio, (2) cement content, (3) and air-entrancement agent are designated to be assessed from the aspects of rheological, mechanical and durability properties. The results confirmed the effectiveness of air-entrained SCC mixtures for freeze-and-thaw actions. Moreover it was found that the w/c ratio and cement content could be useful in this regard.

Keywords: Self consolidating concrete; freeze and thaw action; mechanical properties; air entrainment agent; airfield concrete pavement.

* Corresponding author: hayati@iust.ac.ir