

پیشنهاد مدل پایه برای بررسی تنش‌های ناشی از شرایط یخبندان در جداول بتنی

امین ضیائی نیا^۱ و حمید اسکندری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، پردیس دانشگاه حکیم سبزواری
^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری

^۱ Amin.ziaeinia@gmail.com

^۲ Hamidiisc@yahoo.com*

کد موضوع مقاله: D

5D

چکیده:

یکی از عوامل مهم تخریب جداول، یخزدگی بتن‌های مرطوب می‌باشد، چرا که آب به هنگام یخزدن ازدیاد حجم پیدا کرده و باعث تولید تنش‌های مخرب درونی شده و در نتیجه بتن ترک می‌خورد. ترک‌ها و درزهایی که نتیجه ذوب و یخبندان‌های متوالی می‌باشند، باعث فرسایش سطح بتن شده و به تدریج عمق خرابی بیشتر می‌شود. یخزدگی بتن و میزان تخریب حاصله علاوه بر ترک‌ها و درزها به درجه تخلخل و نفوذپذیری بتن نیز بستگی دارد.

در این بررسی جداول بتنی تحت تاثیر یخزدگی آب داخل منافذ، با نرم‌افزار اجزاء محدود، مدل گردیده است. در این مدل‌سازی شرایط مختلف اجرایی از قبیل اینکه بعضی از منافذ با توجه به اینکه نزدیکتر به سطح هستند از درجه اشباع بالاتری برخوردارند، در نظر گرفته شده است. همچنین مدل‌سازی برای درصدهای حباب هوای متفاوت انجام شد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد بخش‌های بیرونی جداول تحت تنش‌های حرارتی بیشتری قرار دارند که با اجرای دو تکه‌ای جداول و قابلیت تعویض رویه‌ها می‌توان از تولید مجدد جداول تا حد زیادی جلوگیری نمود. همچنین افزودن حباب هوا در صورتی می‌تواند بیشترین تاثیر را در دوام داشته باشد که به روش‌های گوناگون از جمله رنگ‌آمیزی جداول با غلظت مناسب، منافذ سطحی پرگردد تا از ورود آب به داخل منافذ و ایجاد تنش‌های مازاد جلوگیری شود. در غیر این صورت تخلخل زیاد در مناطق برف‌گیر می‌تواند سبب خرابی زود رس جداول گردد.

واژگان کلیدی: مدل سازی، اجزاء محدود، جدول بتنی، دوام.

Basic model suggestion for evaluating stresses due to freezing conditions in concrete curbs

¹ Amin Ziaeinia, Hamid Eskandari*²

¹ M.Tech. Student of Structural Engineering, Pardis of Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

¹ Amin.ziaeinia@gmail.com

^{2*} Hamidiisc@yahoo.com

Subject Code: D

5D

Abstract

One of the important causes for damaging of curbs is freezing of wet concretes due to the increase in volume of water during freezing which cause damaging stresses produced by internal cracks in concrete. Cracks and joints which are merged by continuing freezing and thawing can cause eroding the concrete surface and gradually more depth of destruction. Freezing of concrete and following damages are depends on the degree of porosity and permeability in addition to the effect of cracks and joints.

In present study, concrete curbs under the effect of freezing the water inside the pores has been modeled by using finite element software. In this modeling the various conditions is considered, such as the number of pores that are closer to the surface due to the upper saturation level, is considered. The modeling is also done for the various air voids percent.

The results of modeling show that outer curbs parts are under higher thermal stresses which with the implementing these curbs in two pieces and replacing the part of destruction can prevent from producing concrete again. Air entraining can also have the greatest effect on the durability if in various methods such as painting the curbs with appropriate density, surface pores be filled and prevent the water entering and extra tensions. Otherwise, the high porosity zones induce early damages in snowy regions.

Keywords: Modeling, Finite Element, concrete curbs, Durable.

۱. مقدمه:

جداول بتنی یکی از پرمصرفترین قطعات بتنی پیش ساخته می‌باشند که از لحاظ زیبایی، هدایت آبهای سطحی و جداسازی سطوح حائز اهمیت می‌باشد. بطوریکه برای نحوه ساخت و طرح اختلاط آن آیین‌نامه‌های زیادی وجود دارد که جهت بهبود کیفیت پیشنهادهایی را ارائه نموده‌اند. لحاظ نکردن پارامترهای موثر بر دوام، در شرایط اقلیمی مختلف کشور و ضعف‌های اجرایی، از عمده‌ترین دلایل کاهش عمر مفید جداول بتنی می‌باشد [۱]. اعتقاد بر این است که مهمترین جنبه دوام بتن در مناطقی که در معرض سرما هستند مقاومت آن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان است. این آسیب با تخریب سطح شروع شده و به عمق بتن گسترش می‌یابد [۲] که برای مقابله با آن یکی از پارامترهای مهم افزودن حباب هوا می‌باشد که تاثیرات متفاوتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی جداول بتنی دارد [۳]. برای اولین بار در اواسط دهه ۱۹۳۰ محققان متوجه تاثیر حباب هوا در دوام بتن شدند. این کشف کاربرد بتن را دچار تحول عظیمی کرد [۴، ۵]. بین حباب هوای تصادفی که تاثیرات منفی زیادی به همراه دارد و حباب هوای عمدی که به صورت بسیار ریز و یکنواخت در بتن وارد می‌شود تفاوت زیادی وجود دارد. دوام بتن با استفاده از حباب‌های بسیار ریزو نزدیک به هم که به صورت عمدی در خمیر سیمان وارد می‌شوند در چرخه‌های ذوب و یخبندان به میزان زیادی افزایش می‌یابد [۶، ۷]. یکی از کاربردهای مواد حباب‌زا در ساخت جداول بتنی می‌باشد. با توجه به نوع شرایط اقلیمی و وجود نمک‌های زیان‌آور در آب و خاک و شرایط رویارویی مختلف محیطی، برای ایجاد دوام مناسب، لازم است از مواد حباب‌زا در طرح مخلوط بتن استفاده کرد [۸]. هر چند در بتن‌های بدون حباب هوا با نفوذپذیری کم [۹]، و افزایش مقاومت [۱۰، ۱۱]، دوام در چرخه‌های ذوب و یخبندان افزایش می‌یابد اما تحقیقات نشان داده که حتی مقاومت‌های فشاری بالا، تا ۷۰ مگاپاسکال هم نمی‌تواند همیشه تضمینی برای عملکرد مناسب بتن در این شرایط باشد. مطالعات متعددی از جمله تحقیقات سورنسن نشان داد که حتی برای اطمینان از عملکرد مناسب بتن‌های حاوی میکروسلیس در شرایط ذوب و یخبندان با وجود کاهش احتمالی در مقاومت فشاری، افزودن حباب هوا لازم می‌باشد [۱۲]. استفاده از حباب هوا در بتنی که در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دارد سبب شده بتن توانایی مقابله با فشار هیدرولیکی ایجاد شده در نتیجه انجماد آب در خمیر سیمان را بدست آورد [۱۳] در واقع فشار هیدرولیکی، آب را به درون حباب‌های هوا هدایت می‌کند و به این ترتیب فشار ناشی از تبلور کاهش می‌یابد. تصور غلط عموم بر این است که آسیب ناشی از چرخه‌های ذوب و یخبندان در کل ناشی از فشار هیدرولیک بوده است حال آنکه دلیل اصلی تخریب بتن انجماد داخلی و فشار تبلور می‌باشد و نقش حفره‌های هوا ایجاد مکانی برای هسته‌زایی یخ‌های ماکروسکوپی است که با رشد خود باعث اعمال فشار به فاز جامد می‌گردند [۱۴].

برای بدست آمدن درک مناسبی از تنش ناشی از انبساط آب به هنگام یخ زدن در جداول بتنی اشباع یا نیمه اشباع در شرایط قرار گیری محیطی، استفاده از مدل سازی با نرم افزارهای اجزاء محدود میتواند بسیار سودمند بوده و تصویر مناسبی از آن ارائه نماید.

یکی از مجموعه نرم‌افزارهایی که مبتنی بر روش اجزاء محدود، توانایی حل مسائل، از یک تحلیل خطی ساده گرفته تا پیچیده ترین تحلیل‌های غیرخطی را داراست نرم‌افزار آباکوس می‌باشد که با آن می‌توان مجموعه بسیار گسترده‌ای از المان‌ها با هر نوع هندسه‌ای را به صورت نرم‌افزاری مدل کرد. مدلسازی کمک می‌کند تا با توجه به امکانات اجرائی و شرایط اقتصادی، تصویری روشن از عملکرد نمونه، با در نظر پارامترهای مورد نظر بدست آید.

بر اساس استاندارد ایران برای جداول پیش‌ساخته بتنی و بسیاری از منابع، در شرایط محیطی مختلف بکارگیری حباب هوا توصیه شده است. با توجه به اینکه جداول بتنی در محیط، در شرایط اشباع یا نیمه اشباع قرار می‌گیرند. افزایش حجم ناشی از انجماد آب در حباب‌های هوای بتن سبب پیدایش تنش‌هایی در بتن می‌شود. در این مقاله سعی شده این افزایش حجم با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل شده و تصویری از تنش‌های به وجود آمده از آن، در بتن ارائه شود.

۲. مبانی تحقیق:

میزان حباب هوای پیشنهاد شده برای شرایط محیطی مختلف از ۳ تا ۷/۵ درصد متفاوت است [۱۵]. حباب هوای عمدی در بتن را می‌توان به وضوح از هوایی که به صورت اتفاقی در بتن باقی می‌ماند، تمیز داد. این نوع هوا از لحاظ اندازه حباب‌ها متفاوتند. در بتن هوادار اندازه حباب‌های عمدی در حدود ۵۰ میکرون است، در صورتی که هوای باقی مانده اتفاقی معمولاً تشکیل حباب‌های خیلی بزرگتری را می‌دهند، که بعضی از آنها به اندازه حفره‌های نامطلوبی که در سطح بتن مشاهده می‌شوند، خواهند بود. ایجاد حباب هوا در بتن سبب می‌شود که در خمیر سیمان منافذ ریز تقریباً کروی شکل جدا از یکدیگر به وجود آیند [۱۷].

چاترچی به این نکته اشاره کرده که حباب هوا برای مقابله با فشار هیدرولیکی ناشی از یخ‌زدن آب در منافذ، از دیگر روشها موثرتر می‌باشد و کارایی بیشتر آن را به تاثیر چسبندگی یخ به سطح داخلی حفره و استخراج بیشتر آب از منافذ، نسبت داد [۱۶]. در واقع آب به هنگام ورود به حباب‌های بسیار ریز هوا به دیواره آن چسبیده و سپس یخ می‌زند.

در طی انجماد یخ در منافذ مویرگی خمیر سیمان، تا حفره‌های هوا، بدون آسیب رساندن به بتن گسترش خواهد یافت [۱۷]. فاگرلند نشان داد که آسیب ناشی از انجماد آب وقتی سریعاً رخ می‌دهد که درجه اشباع از حد معینی تجاوز کند و برای بتن‌های هوادار این میزان متناسب با شرایطی است که بیش از ۴۰ درصد از حفره‌های هوا از آب پر شده باشد. مکانیزم آسیب یخ‌زدن آب در آزمایشات فاگرلند، فشار هیدرولیک به وجود آمده از انجماد یخ نبوده بلکه این آسیب ناشی از ترکیدن حفره‌های هوای پر شده از آب می‌باشد [۱۸]. بنابراین در این مقاله تنها تاثیر انبساط آب به هنگام یخ‌زدن در حباب‌های هوا مدل گردیده و فرض شده ۴۳ درصد از حباب‌ها از آب پر شده است.

۳. فرضیات:

شرایط محیطی مورد بررسی برای جدول در اینجا شرایط خیلی شدید می‌باشد. مطابق با ISIRI12728 برای شرایط محیطی خیلی شدید از ۶ تا ۷/۵ درصد حباب هوا در جداول، باید بهره برد که در اینجا ۷ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین در این آیین‌نامه مقاومت فشاری مورد نیاز برای این شرایط ۳۰ مگاپاسکال ذکر شده که مقاومت خمشی رده S این آیین‌نامه را تامین می‌نماید و با توجه به رابطه تقریبی $E = 5000\sqrt{f_c}$ (که در آیین‌نامه بتن ایران ارائه شده) مدول الاستیسیته بتن حدود ۲۵ گیگاپاسکال به دست می‌آید. همچنین نسبت پواسون بتن برابر ۰/۲ فرض شده است. همچنین با توجه به شرایط محیطی درجه اشباع به حدی است که ۴۳ درصد از حجم حباب‌های هوا به هنگام یخ‌زدن آب این حباب‌ها، از آب پر شده‌اند. همچنین با توجه به توضیحات داده شده فرض شده حباب‌های هوا به صورت کروی بوده و قطر آنها ۰/۰۵ میلی‌متر می‌باشند و توزیع آنها در جداول به صورت یکنواخت است و آب به هنگام ورود به حباب‌های هوا به دیواره آن چسبیده و سپس یخ می‌زند.

در این مقاله تاثیر یخ‌زدگی آب در حباب‌های هوای عمدی جداول بتنی با فرضیات ذکر شده را بررسی نموده‌ایم. همچنین در ادامه تاثیر کاهش درصد حباب هوا در نمونه جدول مورد بررسی، به ۵ و ۳ درصد، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است.

۴. مدلسازی:

در این قسمت با توجه به اینکه میلیون‌ها حباب بسیار کوچک در یک جدول بتنی ساخته شده از بتن هوادار وجود دارد که توزیع آنها به صورت متقارن بوده و عملکرد مشابه نیز دارند، بنابراین می‌توان به جهت افزایش سرعت کار و همچنین دقت بیشتر در مش‌بندی و تولید مش‌های منظم، بجای مدل کردن یک بلوک جدول کامل، یک مکعب که در واقع سهم هر حباب هوا می‌باشد را مدلسازی نمود.

به این منظور در ابتدا باید محاسبه نمود که فاصله مرکز به مرکز حباب‌ها (d) چقدر خواهد بود. اگر شعاع کره‌ها (که برابر با ۰/۰۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد)، و V_0 حجم هوا و n تعداد حباب در راستای هر ضلع باشد، با توجه به درصد هوای بتن (A) در یک مکعب بتنی خواهیم داشت:

$$v_0 = \frac{4}{3}\pi r^3 \times n^3 = 10^6 A \Rightarrow \begin{cases} \text{برای هوای 7 درصد} \rightarrow n = 1023 \Rightarrow d = 0.098 \text{ mm} \\ \text{برای هوای 5 درصد} \rightarrow n = 914 \Rightarrow d = 0.11 \text{ mm} \\ \text{برای هوای 3 درصد} \rightarrow n = 771 \Rightarrow d = 0.13 \text{ mm} \end{cases}$$

بر اساس فرضیات زمانی که بتن دارای ۷ درصد هواسست ۴۳ درصد از هر حباب از آب پر شده است. با در نظر گرفتن این نکته که با افزودن حباب هوا نفوذپذیری بتن زیاد نمی‌شود [۷] بنابراین در صورتی که برای ساخت همان بتن از ۵ و ۳ درصد هوا در بتن بهره ببریم به ترتیب ۶۰ و ۱۰۰ درصد از هر حباب از آب پر می‌شود.

از طرفی با توجه به مطالب گفته شده در هر حباب قشایی از یخ دور تا دور حباب را دربر گرفته و قسمت خالی هر حباب در مرکز آن قرار گرفته است. همچنین می‌دانیم میزان افزایش حجم آب به هنگام یخ‌زدن ۹ درصد بوده و با لحاظ کردن این نکته که یخ ماده‌ای با خواص ایزوتروپیک می‌باشد [۱۹] اگر R_1 شعاع داخلی آب درون حباب به هنگام یخ‌زدن، و R'_1 شعاع داخلی یخ بعد از انبساط، و R_2 شعاع حباب (که ۰/۰۲۵ میلی‌متر می‌باشد)، و R'_2 شعاع بیرونی کره یخ بعد از انبساط، و x میزان افزایش شعاع بیرونی یا کاهش شعاع داخلی بوده و w میزان درصد پر شده هر حباب از آب باشد، خواهیم داشت:

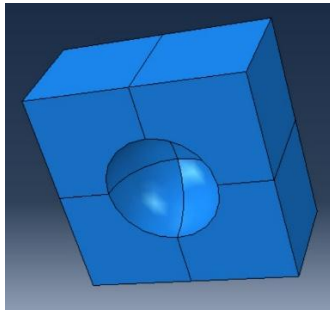
$$\frac{4}{3}\pi(R_2^3 - R_1^3) = w \times \frac{4}{3}\pi R_2^3 \Rightarrow R_1^3 = (1 - w)R_2^3$$

$$\frac{4}{3}\pi(R_1^3 - (R_1 - x)^3) + \frac{4}{3}\pi((R_2 + x)^3 - R_2^3) = 0.09 \times w \times \frac{4}{3}\pi R_2^3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{برای هوای 7 درصد} \rightarrow x = 1.91 \times 10^{-4} \text{ mm} \\ \text{برای هوای 5 درصد} \rightarrow x = 2.91 \times 10^{-4} \text{ mm} \\ \text{برای هوای 3 درصد} \rightarrow x = 7.3 \times 10^{-4} \text{ mm} \end{cases}$$

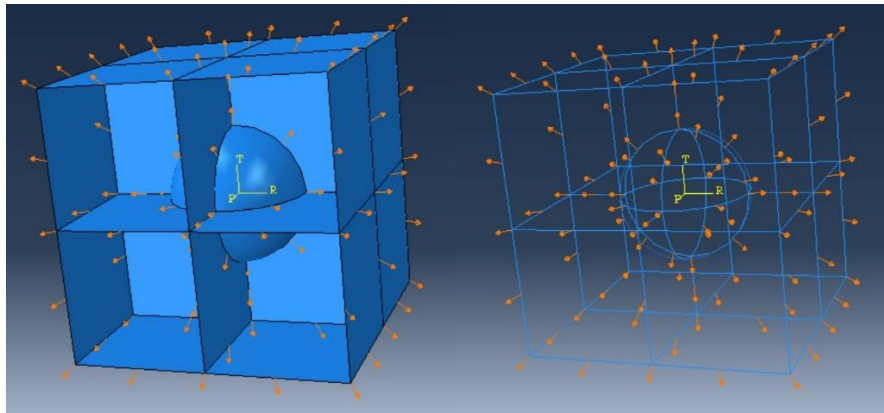
بنابراین برای مدل شدن رفتار آب به هنگام یخ‌زدن در حباب‌ها و محاسبه تنشی که به بتن وارد می‌کند، شعاع هر کره بسته به میزان حباب موجود در آن متناسب با X بدست آمده، افزایش خواهد یافت. این افزایش تا حدی است که یخ بتواند چنین تنشی را تحمل نماید. به این جهت افزایش شعاع را تا یک دهم میزان بدست آمده برای X کاهش خواهیم داد.

در مدل سازی بتن با درصد‌های حباب هوای مختلف، در هر مورد مکعبی به ابعاد ذکر شده بر حسب میلی‌متر و یک کره به شعاع ۰/۰۲۵ میلی‌متر ترسیم گردید. بعد از اختصاص خصوصیات بتن (مدول یانگ و نسبت پواسون) به مکعب، حباب ابتدا در مرکز مکعب قرار گرفته و سپس برش داده شد و قطعه به وجود آمده جدید به شکل مکعبی با هسته توخالی در آمد و برای بهبود کیفیت مش تولید شده قطعه را پارتیشن‌بندی نمودیم (شکل ۱).



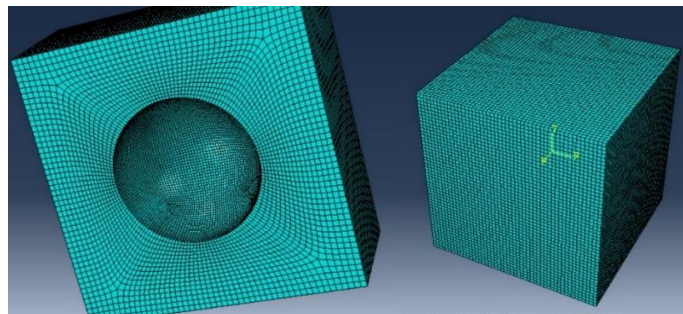
شکل ۱: مقطع بتن با حباب هوا در مرکز، که پارتیشن بندی شده

با توجه به اینکه در قطعه مورد بررسی تنها جابجایی ناشی از انبساط مدنظر است نوع تحلیل بر روی حالت استاتیکی تنظیم شد. در بارگذاری برای شبیه سازی انبساط و تنش ناشی از آن تنها افزایش شعاع کره به میزان ذکر شده برای درصدهای مختلف هوا مدنظر است. به این منظور دستگاه مختصاتی قطبی به صورت محلی به مبدا مرکز کره تعریف شده و میزان افزایش شعاع در این قسمت وارد شده است. (شکل ۲)



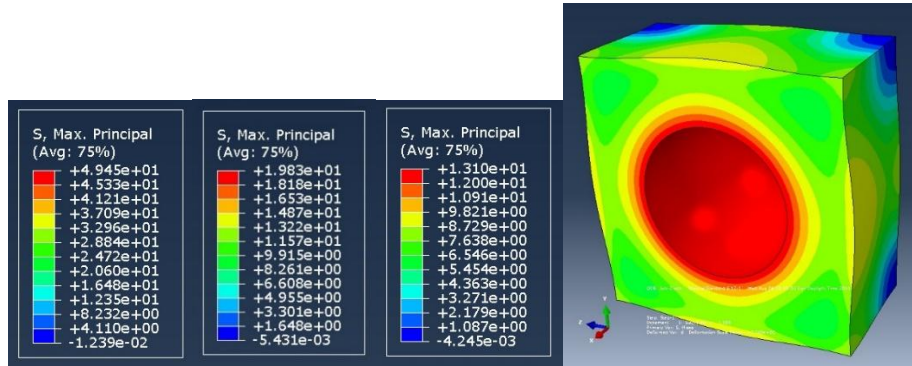
شکل ۲: نحوه اعمال بار به شکل افزایش شعاع کره

برای بتن با درصد هوای ۰٫۷، ۵ و ۳ اندازه کلی المانها به ترتیب ۰٫۰۰۲، ۰٫۰۰۲۴ و ۰٫۰۰۲۶ میلیمتر و ضریب انحراف به ترتیب ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۶ و ۰٫۰۰۶۵ تعریف گردید. همچنین برای بهبود کیفیت مش های تولیدی دانه بندی اضلاع منتهی به کره به صورت جهت دار تنظیم شده است. نوع مش از نوع شش وجهی بوده و در تمامی موارد زوایایی بین ۴۰ تا ۱۳۰ درجه دارند و میانگین زوایا تقریبا ۷۵ و ۱۰۵ می باشد (شکل ۳).



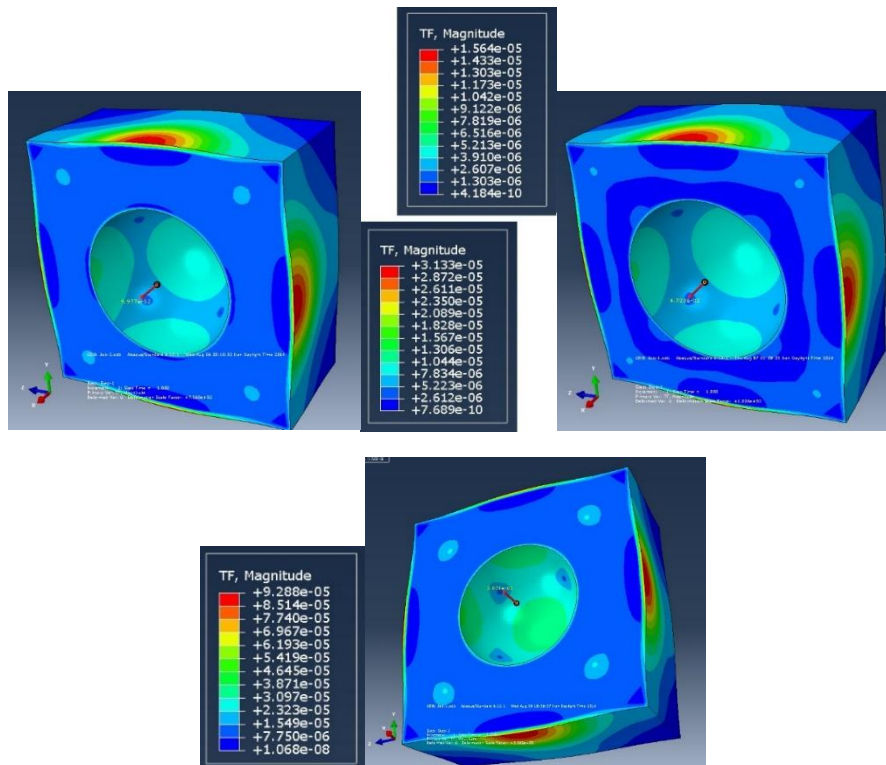
شکل ۳: نمای مش بندی قطعه بتنی و مقطع آن

پس از تحلیل قطعه بتنی با درصد هوای مختلف که به تبع آن ابعاد متفاوت مکعب مدل شده را به همراه دارد نتایج از نرم افزار استخراج شد. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل برای بتن های ۷، ۵ و ۳ درصد حباب هوا، تنش های اصلی حداکثر به ترتیب ۱۳، ۲۰ و ۴۹ مگاپاسکال بدست می آید (شکل ۴)



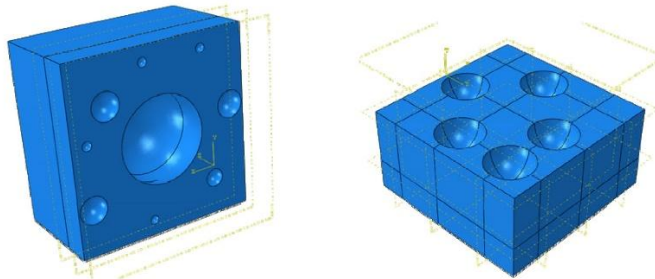
شکل ۴: تنشهای اصلی حداکثر، به ترتیب از راست به چپ مربوط به حباب هوای ۷، ۵ و ۳ درصد می باشد.

همچنین برای حداکثر برآیند نیروهای وارد به صفحات موازی با سطوح شش وجهی که مربوط به صفحه گذرنده از مرکز کره می باشد به ترتیب اعداد ۰/۴۷، ۰/۱ و ۰/۴ نیوتن بدست می آید. بنابراین تنش متوسط در این صفحه به ترتیب ۶، ۱۰ و ۲۷ مگاپاسکال بدست خواهد آمد (شکل ۵).



شکل ۵: نمایش توزیع برآیند نیروهای وارد بر هر نقطه، به ترتیب از راست به چپ مربوط به حباب هوای ۷، ۵ و ۳ درصد می باشد.

در گزارشی در این زمینه محققان دانشگاه پنسیلوانیا با افزودن حباب هوا به بتن، به دو روش آزمایشگاهی تاثیرات حباب هوا را بر روی تنش‌های حرارتی وارد بر بتن در چند ساعت اولیه پس از بتن ریزی بررسی نموده‌اند و در نهایت نتایج آزمایشگاهی را با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس مقایسه نموده‌اند که در شکل ۶ ارائه گردیده است [۲۰].



شکل ۶: نمونه‌های مدل شده در گزارش ارایه شده توسط دانشگاه پنسیلوانیا [20].

با توجه به مقایسات انجام شده بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی فوق می‌تواند شروعی برای مطالعات آینده بوده و با در نظر گرفتن میزان حباب به اندازه کافی، تنش‌هایی واقعی‌تر بدست آید.

۵. نتیجه گیری :

نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد، هرچند در این مدل سازی کاستی‌هایی وجود دارد و به خاطر ساده سازی برخی موارد در نظر گرفته نشده‌اند اما می‌توان برای مدل‌سازی تنش‌های ناشی از یخ‌زدن آب در بتن هوادار، از نرم افزارهای اجزاءمحدود بهره برد و به نتایجی مطلوب دست یافت. مدل‌سازی به این شیوه می‌تواند درک مناسبی از رفتار بتن به هنگام یخ‌زدن آب در منافذ آن ارائه دهد.

همچنین نتایج حاکی از آن است که در صورت استفاده از حباب ۵ و ۳ درصد به جای ۷ درصد در شرایط محیطی خیلی شدید صدمات زیادی به بتن وارد خواهد آمد و تخریب بتن را در زمان کوتاه‌تری در پی خواهد داشت. به طوریکه تنش‌های وارد بر بتن در حالت استفاده از حباب ۳ درصد چندین برابر بیشتر از حباب ۷ درصد بوده و بتن‌های عادی توان تحمل چنین تنش‌هایی را ندارند. بنابراین در تولید و ساخت جداول برای افزایش طول عمر و بهبود عملکرد، حتما باید از حباب هوا بهره برد.

تنش‌های وارد بر بتن، در جاهایی که با آب به هنگام یخ زدن در تماس باشد، بیشترین مقدار خود را دارد به سرعت با افزایش فاصله از این مناطق مرزی، تنش‌ها کاهش می‌یابد. پس به هنگام یخ‌زدن آب در منافذ، مناطق مرزی بیشترین آسیب را خواهند دید و منجر به ترک‌های ریزی در این مناطق خواهد شد و با هر بار تکرار چرخه ذوب و یخبندان عمق ترک‌ها افزایش خواهد یافت و موجب تخریب جدول خواهد شد.

۶. مراجع:

- [1] Standard Iran. Concrete kerb units-Specifications and test methods. ISIRI 12728. 1st.edition. 1388.
- [2] Shang, Huaishuai, Yupu Song, and Jinping Ou. "Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles." Acta Mechanica Solida Sinica 22.3 (2009): 261-266.
- [3] ACI Committee. "Guide to durable concrete." American Concrete Institute 201.2R-01, 2001.
- [4] Du, Lianxiang, and Kevin J. Folliard. "Mechanisms of air entrainment in concrete." Cement and concrete research 35.8 (2005): 1463-1471.

- [5] E. A. Finney. Air entrained concrete. Research Laboratory Testing and Research Division Report No. 54 June 8, 1944
- [6] Elsen, Jan, et al. "Quality assurance and quality control of air entrained concrete." *Cement and concrete research* 24.7 (1994): 1267-1276.
- [7] A.M, Neville. "Concrete Properties". (2011), 5th.
- [8] H.J. Schlumpf, B. Bichersika, O. Schwoon. *Sika Concrete Handbook*. Sika AG. Edition 2013
- [9] Wang, Kejin, Gilson Lomboy, and Robert Steffes. "Investigation into Freezing-Thawing Durability of Low-Permeability Concrete with and without Air Entraining Agent." (2009).
- [10] Shang, Huai-Shuai, and Ting-Hua Yi. "Freeze-thaw durability of air-entrained concrete." *The Scientific World Journal* 2013 (2013).
- [11] Bassuoni, M. T., and M. L. Nehdi. "The case for air-entrainment in high-performance concrete." *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings* 158.5 (2005): 311-319.
- [12] Sabir, B. B., and K. Kouyiali. "Freeze-thaw durability of air-entrained CSF concrete." *Cement and Concrete Composites* 13.3 (1991): 203-208.
- [13] Shang, Huai-shuai. "Triaxial T-C-C behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles." *Cold Regions Science and Technology* 89 (2013): 1-6.
- [14] Scherer, George W., and John J. Valenza II. "Mechanisms of frost damage." *Materials science of concrete* 7 (2005): 209-246.
- [15] ACI Committee. "Guide to durable concrete." American Concrete Institute 201.2R-08, 2008
- [16] Chatterji, S. "Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents." *Cement and Concrete Composites* 25.7 (2003): 759-765.
- [17] Łażniewska-Piekarczyk, Beata. "Examining the possibility to estimate the influence of admixtures on pore structure of self-compacting concrete using the air void analyzer." *Construction and Building Materials* ۴۱ (۲۰۱۳): ۳۸۷-۳۷۴.
- [18] Fagerlund, Göran. "The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete." *Matériaux et Construction* 10.4 (1977): 231-253.
- [19] Resnick, Robert, David Halliday, and J. Walker. *Fundamentals of physics*. John Wiley, 1988.
- [20] Lopez de Murphy, Maria, Cliff Lissenden, and Chao Xiao. *Technology Evaluation on Characterization of the Air Void System in Concrete*. No. FHWA-PA-2009-013-PSU 020. 2009.