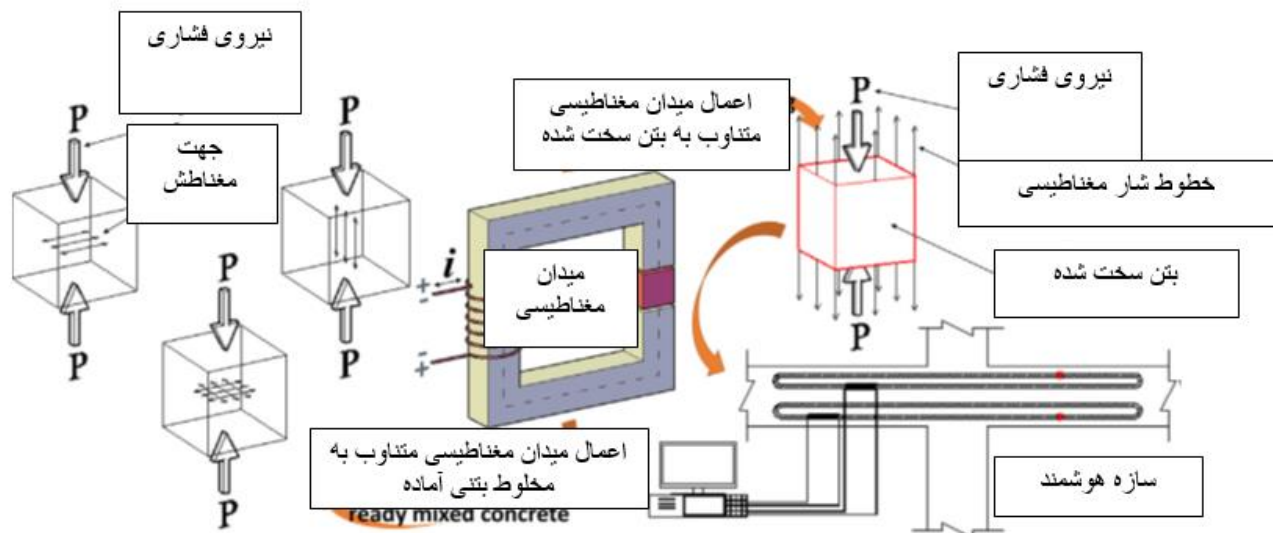


## اثر میدان مغناطیسی بر روی مقاومت فشاری بتن ریزدانه

### چکیده

بررسی به منظور کشف امکان استفاده از میدان مغناطیسی متناوب (AMF) به منظور افزایش مقاومت فشاری و ابداع یک سیستم محرک جدید در سازه های هوشمند انجام پذیرفت. از این رو، چندین آزمایش در مقیاس کوچک بر روی نمونه های مکعبی ریزدانه انجام شد، که در آن ها از اثر AMF با چگالی 0.5 تسلا (T) و فرکانس 50 Hz به منظور آماده سازی مخلوط بتنی استفاده شد و مقاومت فشاری بتن سخت شده اندازه گیری شد. علاوه بر این، نقش AMF اعمالی به مخلوط بتنی آماده شده در تغییر رفتار آن مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور قرار دادن نمونه ها در معرض AMF، یک مدار مغناطیسی ویژه طراحی گردید. اما، قرارگیری بتن در معرض آن سبب افزایش مقاومت آن به میزان 7.78 درصد شد. مزایای این اثر از نقطه نظرهای تئوری گوناگون مورد بحث قرار گرفت. این طور نتیجه گیری شد که این روش می تواند به عنوان پایه ای برای کنترل رفتار سازه های بتنی هوشمند در مقیاس بزرگ و در زمان حقیقی، از طریق تنظیم سختی اعضا توسط AMF مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، امکان استفاده از این روش برای سازه های RC در مقیاس بزرگ توضیح داده شده و یک مثال گرافیکی ارائه گردید.



کلمات کلیدی: میدان مغناطیسی متناوب (AMF)، بتن، مقاومت فشاری، مدار مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی.

## 1. مقدمه

افزایش استحکام سازه های بتنی در مهندسی سازه مسئله ای حیاتی است که منجر به بررسی روش های مختلفی مانند ساخت سازه های هوشمند در برابر نیروهای دینامیکی و بهبود خواص فیزیکی بتن شده است. برای دستیابی به این هدف روش های مختلفی مانند استفاده از افزودنی های شیمیایی و مواد ریزدانه به نام ریزذرات به صورت گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است (به عنوان مثال [1]). اخیراً، به منظور بهبود مشخصات بتن استفاده از الکترومغناطیس ها به شکل گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است.

در سازه های هوشمند الکترومغناطیس ها عمدتاً جهت نظارت بر عملکرد سازه [2و3] مورد استفاده قرار گرفته است. سازه های هوشمند عبارتند از برخی از سنسورها و سیستم های هوشمند متشکل از موادی مانند فیبرهای نوری (FOS) [4-6]، فیزوالکتریک ها [7-9]، مواد مغناطیس رئولوژیکی (MR) [10-11]، مواد الکترو رئولوژیکی (ER) [12،13]، آلیاژهای حافظه شکل (حالت) (SMAS) [14و15]. عملکرد چنین سازه های وابسته به خواص مواد هوشمند دارد. این فناوری ها برای کاربردهایی مانند تشخیص آسیب، کنترل حالت [16 و 17]، کنترل صدا و صوت [18و19]، نظارت بر سلامت [20و21]، کنترل ارتعاش [22و23] و جمع آوری انرژی [24و25] مورد استفاده قرار گرفته اند. با این حال، این روش ها، دارای کاستی های خود می باشند برای مثال موفقیت آمیز نبودن در مراحل اولیه آسیب ها، دشواری نصب سنسورها، کاهش ظرفیت باربری اعضا به دلیل جایگیر بودن، تمایز میان سیستم باربری و سنسور [26].

جهت بهبود خواص (مشخصات) بتن، یک روش جدید استفاده از تعمیر (بهبود) مغناطیسی آب بتن است. این روش بر پایه اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص آب بوده که اولین بار در سال 1902 توسط لرنز شرح داده شد. زمانی که آب در معرض میدانی مغناطیسی قرار می گیرد، میزان ثبات میان مولکول های آب کاهش یافته و سایز مولکول ها افزایش می یابد [27]، بنابراین برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن تغییر می نماید مانند ویسکوزیته، حلالیت،

درجه حرارت، وزن مخصوص، کشش سطحی، هدایت الکتریکی، PH، فشار نفوذپذیری [28و29]. اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه نتیجه گیری کرده اند که استفاده از آب مغناطیسی در ساختار بتن مقاومت فشاری را به میزان 10-25 درصد افزایش داده و کارایی بتن را نیز افزایش می دهد [30-36]. این امر در برخی موارد منجر می شود که، مقدار کمتر سیمان، مقاومت فشاری و کارایی بیشتری را ایجاد نماید. بر اساس یکی از تحقیقات جدید، مقدار سیمان می تواند تا 28 درصد کاهش یابد [30]. علاوه بر این، استفاده از آب مغناطیسی سبب افزایش مقاومت در برابر یخ زدگی و نفوذ شده و شکل پذیری را افزایش می دهد [31]. برخی عوامل مانند مدت زمان ترمیم و قدرت میدان مغناطیسی بر روی این عوامل تاثیر می گذارند. نشان داده شده است که اگر آب در معرض میدان مغناطیسی با چگالی 0.985 T برای 24 ساعت قرار بگیرد، مقاومت فشاری می تواند به مقدار 55 درصد افزایش یافته، علاوه بر این کارایی نیز اندکی افزایش خواهد یافت [37].

اخیراً، اثر اعمال میدان مغناطیسی در ترکیبات بتنی متشکل از پودر آهن کربونیل (به عنوان ماده MR [38]) بر روی خواص بتن تازه مورد مطالعه قرار گرفته است. مشاهده گردید که این شیوه مقاومت بتن را افزایش داده اما تاثیری بر روی مقاومت فشاری ندارد [39]. بر اساس تحقیق جدید دیگری که اثر میدان مغناطیس استاتیک با قدرت های مختلف تا حداکثر 25.37 گاس (یک گاس =  $10^{-4}T$ ) را بر روی خواص خمیر سیمان در سنین مختلف، تا نمونه های 7 روزه خمیر سیمان را بررسی می کرد، مشاهده گردید که هر چه مقدار ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) بیشتر باشد مورفولوژی آن متراکم تر شده و با مقدار تخلخل کمتر قدرت القای الکترومغناطیسی بالاتری ایجاد می شود، میدان مغناطیسی ترکیب کانی های سیمان هیدراته شده را تغییر داده و مقدار مقاومت فشاری خمیر سیمان را در طی 7 روز به مقدار 13 درصد در نمونه های با میدان مغناطیسی 25.37 گاس، افزایش می دهد [40].

با این حال، مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر اعمال مستقیم میدان مغناطیسی بر روی خواص فیزیکی مواد سیمانی بسیار محدود بوده است. علاوه بر این، استفاده از میدان های مغناطیسی برای بتن های حاوی مواد هوشمند تقریباً محدود به میدان مغناطیسی اعمالی به مواد سیمانی تازه و خواص حالت تازه آن ها می باشد. بر اساس

اطلاعات نویسندگان، هیچ تحقیق انجام نشده است که به بررسی (a) اثر میدان مغناطیسی متناوب (AMF) اعمال شده به مخلوط بتنی، (b) اثر جهت AMF اعمالی به مخلوط بتنی آماده، و (c) اثر اعمال AMF به بتن سخت شده، بر روی خواص فیزیکی آن بپردازد.

هدف از این تحقیق بررسی این موارد و کشف امکان ایجاد نسلی جدیدی از سازه های بتنی هوشمند با استفاده از AMF، و انجام چند آزمایش در مقیاس کوچک بر روی نمونه های بتنی ریزدانه متفاوت است. این فرایند به دو مرحله تقسیم بندی شده است: (I) مرحله حالت تازه شامل اثر بتن قرار گرفته در معرض AMF بر روی مقاومت فشاری؛ و نقش جهت AMF اعمالی به بتن تازه در رفتار بتن سخت شده. (II) مرحله حالت تازه شامل اثر AMF اعمالی به بتن سخت شده بر روی مقاومت فشاری.

## 2. ضرورت تحقیق

روش های متفاوتی برای بهبود خواص فیزیکی بتن ارائه شده است. با این حال، نویسندگان معتقدند که اثر اعمال مستقیم میدان مغناطیسی به بتن بر روی مشخصات مکانیکی آن نظیر استفاده از میدان مغناطیسی در کنترل رفتار سازه ای بتن در زمان حقیقی مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو، تحقیق حاضر برای اولین بار مسائل فوق را مورد بررسی قرار می دهد. نتایج چنین بررسی هایی را می توان در کنترل رفتار حقیقی سازه های هوشمند مورد استفاده قرار داد، و دارای مزایای اقتصادی و عملی نسبت به برخی از روش های موجود مانند عدم نیاز به نصب سیستم های دیسکی در بتن خواهد بود.

## 3. بررسی تجربی

### 3.1 مواد

در طی تحقیقات AMF مورد استفاده دارای فرکانس 50 Hz با دامنه 0.5 T بود. سیمان مورد استفاده در تمامی تحقیقات سیمان پورتلند معمولی بوده که خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول 1 ارائه شده است. دانه بندی مورد استفاده ماسه رودخانه ای با حداکثر اندازه ذرات 2.36 میلیمتر بود (0.093 اینچ). به منظور افزایش کارایی نمونه ها، تمامی نمونه ها با استفاده از مقدار برابری از فوق روان کننده ها تهیه شدند. آب مورد استفاده در مخلوط

آب آشامیدنی بود. جهت اجتناب از میزان بالای نشت مغناطیسی به دلیل نفوذپذیری مغناطیسی بالای مواد فولادی، و تقریباً برای تمامی شار مغناطیسی عبوری از بتن تازه در قالب ها، ضخامت قالب های پلاستیکی تمامی نمونه ها برابر با 3 میلیمتر (0.12 اینچ) بود.

### 3.2 برنامه آزمایش

مقاومت فشاری 15 نمونه بتن ریزدانه مورد ارزیابی قرار گرفت. متغیرهای اصلی در آزمایشات عبارت بودند از: (a) زمان های قرارگیری در معرض AMF، (b) جهت قرارگیری در معرض AMF و متغیرها عبارت بودند از: (a) نمونه ها به سه نوع طبقه بندی شدند، شامل: نمونه های غیر مغناطیسی (NM) که در معرض AMF قرار نگرفتند، نمونه های پیش مغناطیسی (PrM) که AMF بلافاصله پس از ریخته شدن بتن تازه در قالب به اعمال شده بودند و نمونه های پس مغناطیسی (PoM) که بتن پس از سخت شدن در معرض AMF قرار گرفته بود. متغیر (b) همراه با نمونه های PrM بوده و وابسته به جهت مغناطیس، همان طور که در جدول 2 و شکل 1 نشان داده شده است می باشد.

جدول 1 - مشخصات (خواص) فیزیکی و شیمیایی سیمان

مقاومت فشاری 28 روزه (MPa) و سطح ویژه بلین (m <sup>2</sup> /kg)	45 300
SiO <sub>2</sub> , %	20.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	5.6
CaO, %	63.0
MgO, %	2.7
SO <sub>3</sub> , %	2.3
Na <sub>2</sub> O, %	0.6
K <sub>2</sub> O, %	0.7
LOI, %	1.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	3.95

Note: 1 MPa = 145 psi; 1 m<sup>2</sup>/kg = 0.542 yd<sup>2</sup>/lb.

جدول 2 - جهت اعمال AMF برای نمونه های PrM

جهت قرارگیری	توضیح
(→ - ←)	نیروی فشاری و AMF در یک جهت به نمونه اعمال شدند (شکل 1(a)).
(→   ←)	نیروی فشاری عمود بر جهت AMF به نمونه اعمال گردید (شکل 1(b)).
(→ + ←)	AWF در دو جهت عمودی به سازه اعمال گردید و نیروی فشاری عمود بر صفحه مغناطیسی اعمال گردید (شکل 1(c)).

تمامی نمونه های مورد مطالعه در جدول 3 ارائه شده اند. در جدول، نمونه ها بر اساس متغیرهای فوق الذکر طبقه بندی شده اند. قسمت اول و دوم نامگذاری ها به ترتیب همراه با متغیرهای a و b می باشد. به عنوان مثال متغیری که PrM (→ | ←) نامگذاری شده است مخفف نمونه پیش مغناطیسی بوده که AMF به بتن آماده به صورت اعمال شده است.

### 3.3 میدان مغناطیسی مورد استفاده: توضیحات و محاسبات

ژنراتور AMF متشکل از یک شیر برقی ساخته شده از یک سیم پیچ متصل به یک هسته آهنی به عنوان ماده مغناطیسی که مطابق با شکل 2 است. مدار مغناطیسی ساده نشان داده شده در شکل 3(a) را در نظر بگیرید. دامنه میدان مغناطیسی به عنوان چگالی شار مغناطیسی به صورت زیر تعریف شده است:

$$B = \frac{\varphi}{A} \quad (1)$$

که در آن  $B$ ,  $\varphi$ , and  $A$  به ترتیب چگالی شار مغناطیسی در  $T$ ، شار مغناطیسی در و بر  $(Wb)$ ، و محدوده مقطع عرضی میدان  $m^2$  هستند. نیروی محرکه مغناطیس (MMF) که شار مغناطیسی را به درون میدان هدایت می کند به صورت زیر خواهد بود:

$$F = NI \quad (2)$$

که در آن  $F, N, l$  به ترتیب چرخش آمپر اندازه گیری شده  $(At)$ ، تعداد گردش های سیم پیچ، و جریان الکتریکی وارده به وسیله سیم پیچ به آمپر  $(A)$  هستند. مقاومت مغناطیسی به صورت زیر حاصل شده است:

$$R = \frac{F}{\phi} \quad (3)$$

که در آن  $R$  مقاومت مغناطیسی میدان است که به صورت هنری معکوس  $(H^{-1})$  محاسبه شده است. مقاومت اعضای مغناطیسی را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (4)$$

که در آن  $l$  طول عضو اندازه گیری شده  $(m)$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad \text{میزان نفوذپذیری مغناطیس مواد در واحد هنری برای هر متر می باشد. } (H.m^{-1}),$$

$\mu_r$  نفوذپذیری مجاز مواد است که بدون بوده،  $\mu_0$  نفوذ پذیری فضای آزاد است که دارای مقدار  $4\pi \times 10^{-7} H.m^{-1}$  می باشد.

و  $A$  مساحت مقطع عرضی عضو  $(m^2)$  می باشد.

معادلات 3 و 4 برای جریان مستقیم (DC) مورد استفاده قرار گرفته اند. در صورتی که میدان جریان متناوب باشد (AC)، مقاومت سیم پیچ مغناطیسی مورد نظر می باشد. بنابراین معادلات فوق به ترتیب با معادلات 5 و 6 جایگزین شده اند. [41 و 42].

$$Z_\mu = \frac{\dot{N}}{\dot{\phi}} = \frac{\dot{N}_m}{\dot{\phi}_m} \quad (5)$$

$$Z_\mu = \frac{l}{\mu \mu_0 S} \quad (6)$$

که در آن  $Z_\mu$  مقاومت سیم پیچ مغناطیسی است.

نشان دهنده دامنه MMF.  $\dot{N}$  and  $\dot{N}_m$

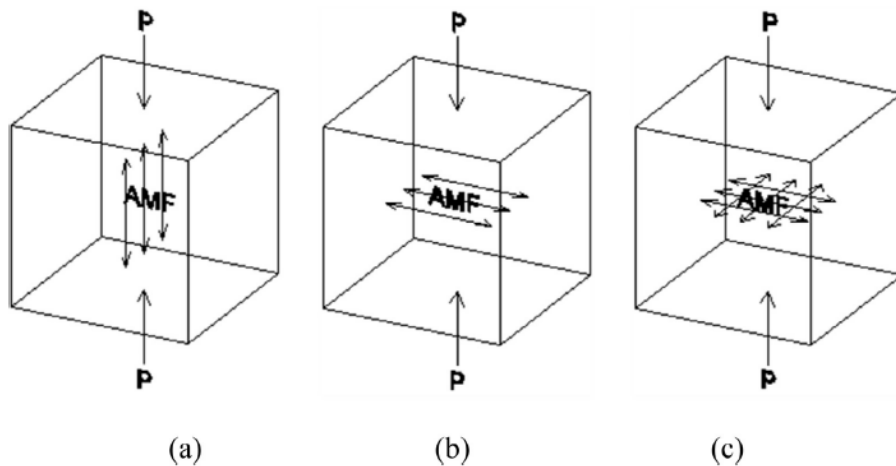
نشان دهنده دامنه شار مغناطیسی.  $\dot{\phi}$  and  $\dot{\phi}_m$

نفوذ پذیری مغناطیسی سیم پیچ.  $\dot{\mu}\mu_0$

S مقطع عرضی عضو می باشد.

بدون در نظر گرفتن نوع شار مغناطیسی که از میدان عبور می کند، مقاومت مستقیماً بخشی از مساحت مقطع عرضی و نفوذ پذیری می باشد [43].

چهار جهت مغناطیسی کردن نمونه های بتنی، یک میدان مغناطیسی با شکاف مطابق با شکل 3b طراحی شد. نمونه های بتنی به گونه ای طراحی شده بودند تا هنگام مغناطیسی شدن در میان شکاف قرار گیرند. در این صورت هسته های آهنی و بتنی یک میدان منفرد را تشکیل می دهند که دارای دو عضو است که به صورت سری متصل شده اند.

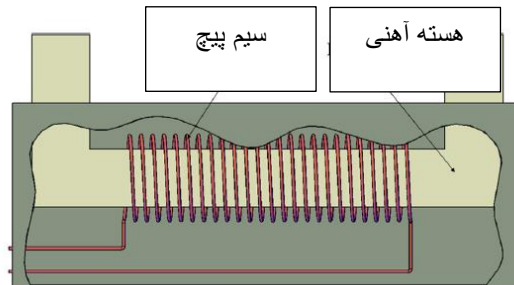


شکل 1 - جهت اعمالی AMF به نمونه های PrM.

جدول 3 - لیست کلی از نمونه های آزمایشگاهی.



نوع نمونه	AMF (تسلا)	تعداد نمونه ها
NM	0	3
PrM (→ - ←)	0.5	3
PrM (→   ←)	0.5	3
PrM (→ + ←)	0.5	3
PoM	0.5	3



شکل 2 - ژنراتور AMF

در این میدان مقدار  $\varphi$  در سراسر میدان ثبات باقی مانده و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\varphi = \frac{F}{R_T} \quad (7)$$

که در آن  $R_T$  برابر است با مجموع مقاومت میدان، که به صورت زیر محاسبه می شود [43]:

$$R_T = R_i + R_c \quad (8)$$

که در آن  $Ri$  و  $Rc$  به ترتیب برابر هستند با مقاومت آهن و اعضای بتنی. در این تحقیق تعداد پیچ های سیم و جریان ثابت می باشد، بنابراین  $F$  ثابت باقی می ماند. در نتیجه بر اساس معادله 7 تنها روش ممکن برای جلوگیری از کاهش شار مغناطیسی حفظ مقاومت کل به کمترین مقدار ممکن می باشد. به صورت تقریبی می توان نفوذپذیری مغناطیسی ناحیه بتنی را مساوی با فضای آزاد  $\mu_0$  فرض کرد. نفوذ پذیری آهن  $\mu_i$  در مقایسه با  $\mu_0$  بسیار زیاد می باشد. این امر موجب می شود که مقدار  $Rc$  در مقایسه با  $Ri$  خیلی زیاد شود، و این امر منجر می گردد که شار مغناطیسی به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. بر اساس معادله 4 و/ یا معادله 6، روش عملی برای جبران کردن این مقدار معکوس با توجه به  $\mu_0$  تا حد ممکن کم نگاه داشتن طول ناحیه بتنی می باشد. از این رو به منظور افزایش اعتبار نتایج، در مطالعه حاضر از نمونه های با ابعاد  $50 \times 50 \times 50$  میلیمتری ( $2 \times 2 \times 2$  اینچی) جهت قرارگیری در معرض AMF استفاده شده است.

#### 3.4 نمونه ها

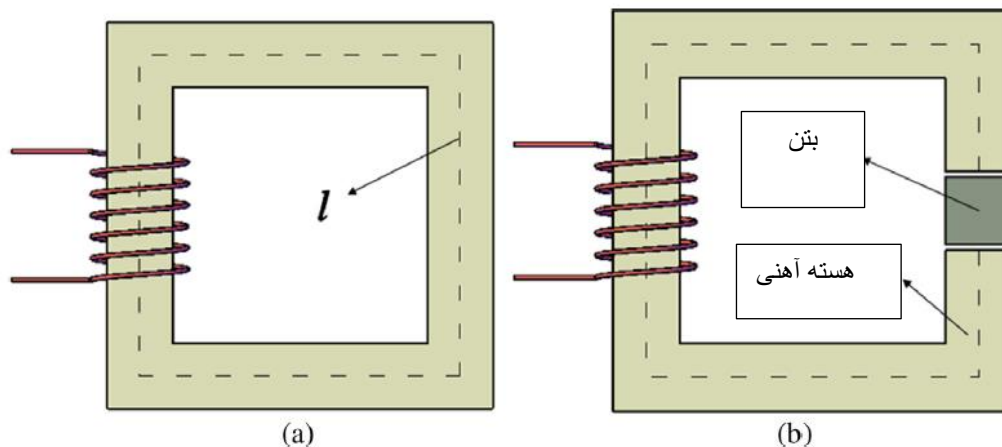
تمامی نمونه ها مطابق با مشخصات مخلوط ارائه شده در جدول 4 تهیه شدند و جهت آماده سازی نمونه ها، ابتدا سوپلاستیزر در آب حل شد. سپس، سیمان و سنگدانه ها با سرعت کم و به صورت دستی برای مدت 2 دقیقه ترکیب شدند. پس از آن، مخلوط آماده آب و سوپلازیستر برای چندین دقیقه و با سرعت پایین مخلوط شدند. در نهایت، مخلوط بتنی که به خوبی ترکیب شده بود درون قالب ها ریخته شد. بلافاصله پس از آن، نمونه های PrM بر اساس جهت مغناطیسی مجاز برای 2 دقیقه، همانند شکل 4 مغناطیسه شدند. همان طور که مشاهده می شود، به منظور جلوگیری از تماس و لرزش قالب ها در زمان مغناطیسه شدن (مغناطش) فاصله کمی میان قالب ها و دو پایانه بود. تمامی نمونه ها به وسیله دو میله فولادی با قطر 3 میلیمتر (0.12 اینچ) متراکم شدند.

برای مغناطیسه کردن نمونه های  $(\rightarrow + \leftarrow)$  PrM، قالب ها هر دو ثانیه یکبار و به صورت پیوسته، از موقعیت خارج شده و 90 درجه چرخیده شدند، و سپس دوباره سر جای خود قرار گرفتند. نمونه ها پس از 24 ساعت از قالب خارج شده و به منظور عمل آوری در آب با دمای حدود 20 درجه سانتیگراد (68 درجه فارنهایت) قرار داده شدند.

### 3.5 روش آزمون

پس از 28 روز مقاومت فشاری نمونه ها در ASTM C109 اندازه گیری شد [44]. برای اطمینان از اینکه AMF بر روی سنسورها ماشین آزمایش در طی آزمون POM نمونه ها تاثیر نگذاشته است، یک ماشین اندازه گیری غیر دیجیتال برای تمامی نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت.

جهت مونتاژ آزمایش برای نمونه های POM، در میان دو قطعه استوانه فولادی به قطر 70 میلیمتر (2.7 اینچ) قرار داده شدند. از این رو تقریباً تمامی AMF به سمت نمونه ها متمرکز شده و نشت مغناطیسی کاهش پیدا کرد. برای آن که شرایط آزمایش ثابت حفظ گردد، تمامی نمونه ها در زمان آزمایش میان این صفحات قرار گرفتند. انجام آزمایش برای نمونه های POM در شکل 5 نشان داده شده است، برای اعمال AMF، پایانه های ژنراتورهای AMF به غلطک های فوقانی و تحتانی ماشین اندازه گیری متصل گردیدند. برای آزمایش هر نمونه POM، AMF تا زمان فروپاشی نمونه ها با آن اعمال گردید.

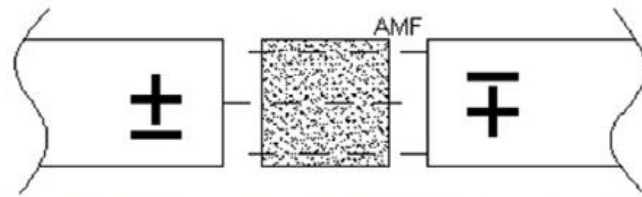


شکل 3 - (a) میدان مغناطیسی ساده، (b) شکاف میدان مغناطیسی مورد مطالعه.

جدول 4 - مقادیر مخلوط نمونه ها.

Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (lit/m <sup>3</sup> )
292.5	450	0.65	1700	20

Note: 0.4536 kg = 1 lb, 0.0254 m = 1 in., 1 lit = 61.026 in.<sup>3</sup>.



شکل 4 - مغناطیسه کردن نمونه های PrM.

#### 4. نتایج و بحث

##### 4.1 نتایج تجربی و بحث

در زمانی که نمونه های PrM در معرض AMF قرار گرفته بودند، حرکت لرزشی اندکی در قالب های بتن ریز دانه تازه مشاهده گردید. این لرزش ها ممکن است ناشی از وجود ذرات باردار در سنگدانه ها و/ یا سیمان باشد. نتایج مقایسه مقدار متوسط مقاومت فشاری نمونه ها در جدول 5 ارائه شده است. افزایش مقاومت فشاری تمامی نمونه ها در شکل 6 نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن نتایج NM و PrM می توان مشاهده نمود که حداکثر تفاوت مقاومت میان آن ها حدود 1 درصد بوده است. بنابراین، به نظر می رسد که مغناطیسه کردن نمونه های بتنی آماده اثر اندکی بر روی رفتار بتن داشته است.

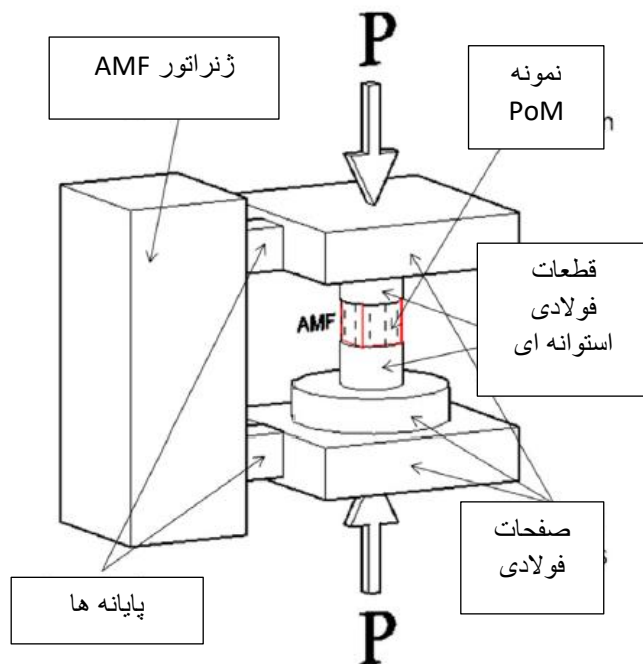
نتایج نمونه های POM نشان می دهد که اعمال AMF به بتن سخت شده مقاومت فشاری آن را به میزان 7.8 درصد افزایش داده است. به نظر میرسد که AMF بر روی میکرو ساختارهای بتن سخت شده تاثیر گذاشته و منجر

شده است که ذرات باردار میکروسکوپی در ماتریس مخلوط بتنی در جهت AMF قرار گرفته و مقاومت فشاری آن را افزایش دهند. این مشاهده نشان می دهد که بتن تازه مغناطیسه شده ممکن است در زمان قرارگیری در معرض AMF، بر روی میکروساختارها نیز تاثیر گذاشته باشد، اما در زمان غیاب AMF ممکن است به حالت قبلی خود بازگشته باشد. این ممکن است دلیل این امر باشد که چرا مقاومت فشاری نمونه های PrM نزدیک به نمونه های NM بود.

تاثیر AMF بر روی خواص بتن سخت شده می تواند از جنبه های متعددی مفید باشد و به منظور کنترل رفتار سازه ها در زمان حقیقی از طریق اعمال نیروهای مغناطیسی زمانی که نیروهای دینامیکی اتفاق می افتند، مورد استفاده قرار گیرد.

#### **4.2 نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه های POM: بحث نظری**

نتایج نمونه های POM را می توان به عنوان نمونه های بتنی با مقایس بزرگ و از جنبه های متعدد کدهای ساخت بتن مورد بحث قرار داد. در زیر، اثر اعمال AMF به بتن سخت شده زمانی که نیروهای قدرتمندی رخ می دهند ارائه شده است و گاهی اوقات، به مواردی مانند حداقل نسبت آرماتورها، مدول الاستیسیته، روابط میان تنش و کرنش، دوام، و لنگر مقاومت اسمی بتن برای ACI318-2014 پرداخته شده است. توجه داشته باشید که تمامی فرمول های ACI بر پایه مقاومت فشاری نمونه های بتنی استوانه ای هستند، اما با این حال استفاده از نتایج مقاومت نمونه های بتنی مکعبی شکل غیرمعمول نبوده و تاثیری در نتایج کلی نخواهد داشت.

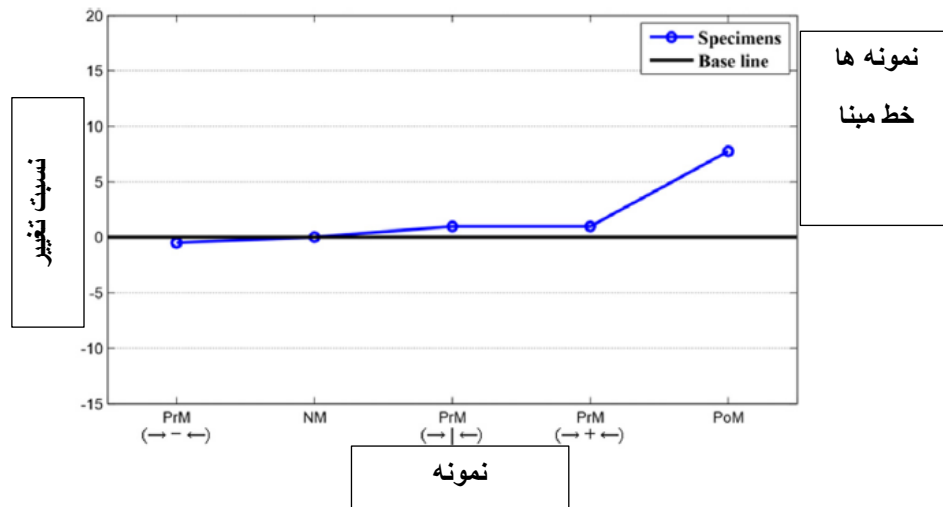


شکل 5 - انجام آزمون برای نمونه PoM.

جدول 5 - نتایج آزمون فشار نمونه ها.

نام نمونه	مقاومت فشاری	انحراف استاندارد	مقدار افزایش
NM	20.6	0.18	0
PrM (→ - ←)	20.5	0.15	-0.48
PrM (→   ←)	20.8	0.12	0.98
PrM (→ + ←)	20.8	0.06	0.98
PoM	22.2	0.26	7.77

Note: 1 MPa = 0.145 ksi.



شکل 6 - مقدار افزایش مقاومت فشاری نمونه ها (توجه  $1\text{MPa}=0.145\text{ ksi}$ )

- حداقل نسبت آرماتورها

حداقل نسبت آرماتورها جهت طراحی تیرهای بتنی مسلح (RC) به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\rho_{\min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y} \geq \frac{1.4}{f_y} \quad (9)$$

که در آن  $f'_c$  and  $f_y$  به ترتیب برابرند با مقاومت فشاری بتن و مقاومت تسلیم آرماتورها بر حسب MPa. اگر

مقدار  $\frac{\sqrt{f'_c}}{4f_y}$  تعیین کننده خواهد بود. با توجه به نتایج PoM می

توان عنوان کرد مغناطیسه کردن تیرهای RC ساخته شده از بتن با  $f'_c \geq 31\text{ MPa}$  ( $f'_c \geq 4.495\text{ ksi}$ ),

زمانی که نیروهای دینامیکی قدرتمندی اتفاق می افتد، مقاومت مکعب  $(f'_{cu})$  و در نتیجه  $f'_c$  به مقدار 7.77

درصد افزایش می یابد. بنابراین، بر اساس معادله 9 می توان مقدار  $\rho_{\min}$  را 3.8 درصد کمتر از مقدار معمول در

نظر گرفت.

- رابطه تنش - کرنش بتن

مدل های متعددی توسط چندین محقق پیشنهاد شده است که رابطه تنش - کرنش بتن را نشان می دهد، در میان آن ها مدل که توسط هانگستد [46] پیشنهاد شده است، مطابق با شکل 7 یکی از معمول ترین مدل ها می باشد. در این مدل، در بخشی از نمودار، تا زمانی که فرض گردد نقطه اوج آن سهمی درجه دو است، تنش از معادله 10 بدست آمده است، و میزان افت آن خطی بوده که از رابطه 11 محاسبه شده است.

$$f_c = f'_c \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$f_c = f'_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon'_c}{\epsilon_{cu} - \epsilon'_c} \right) \right] \quad (11)$$

که در آن  $\epsilon_{cu}$  کرنش نهایی بتن و  $\epsilon'_c$  کرنش در  $f'_c$  می باشد که به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\epsilon'_c = \frac{1.8f'_c}{E_c} \quad (12)$$

که در آن EC مدول الاستیک بتن است. برای بتن با وزن مخصوص WC، مقدار EC به صورت (a) ، (b) محاسبه شده است [45]:

(a) مقادیر WC بین 14.12 و 25.1 KN/m<sup>3</sup> (بین 90 و 160 lb/ft<sup>3</sup>) می باشد.

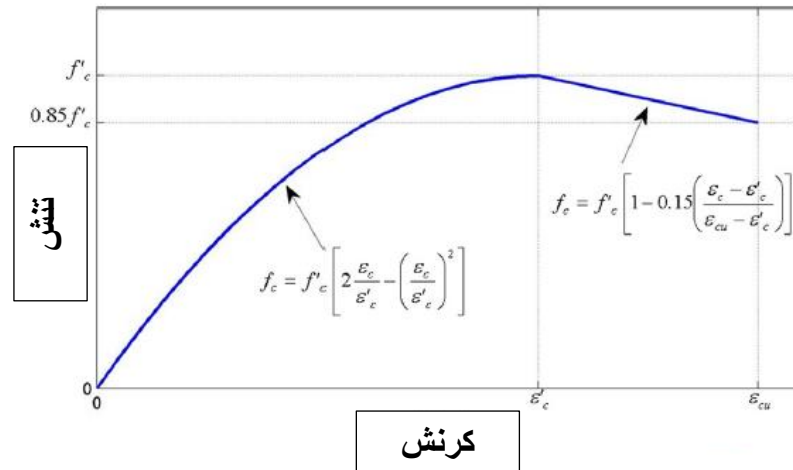
$$E_c = 44w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (\text{in MPa}) \quad (13)$$

(b) برای بتن با وزن عادی

$$E_c = 4730 \sqrt{f'_c} \quad (\text{in MPa}) \quad (14)$$

(Note: 1 MPa = 145 psi).





شکل 7 - منحنی تنش - کرنش بتن توسط هاگنستاد [46].

اگر استفاده از AMF در بتن سخت شده منجر شود که  $f'_c$  به  $\alpha f'_c$  تغییر نماید،  $E_c$  and  $\epsilon'_c$  به ترتیب به  $\sqrt{\alpha} E_c$  and  $\sqrt{\alpha} \epsilon'_c$  تغییر می کنند. بنابراین، رابطه میان تنش و کرنش در حضور AMF با اصلاح رابطه 10 به صورت زیر خواهد بود:

$$f_c = \sqrt{\alpha} f'_c \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} - \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (15)$$

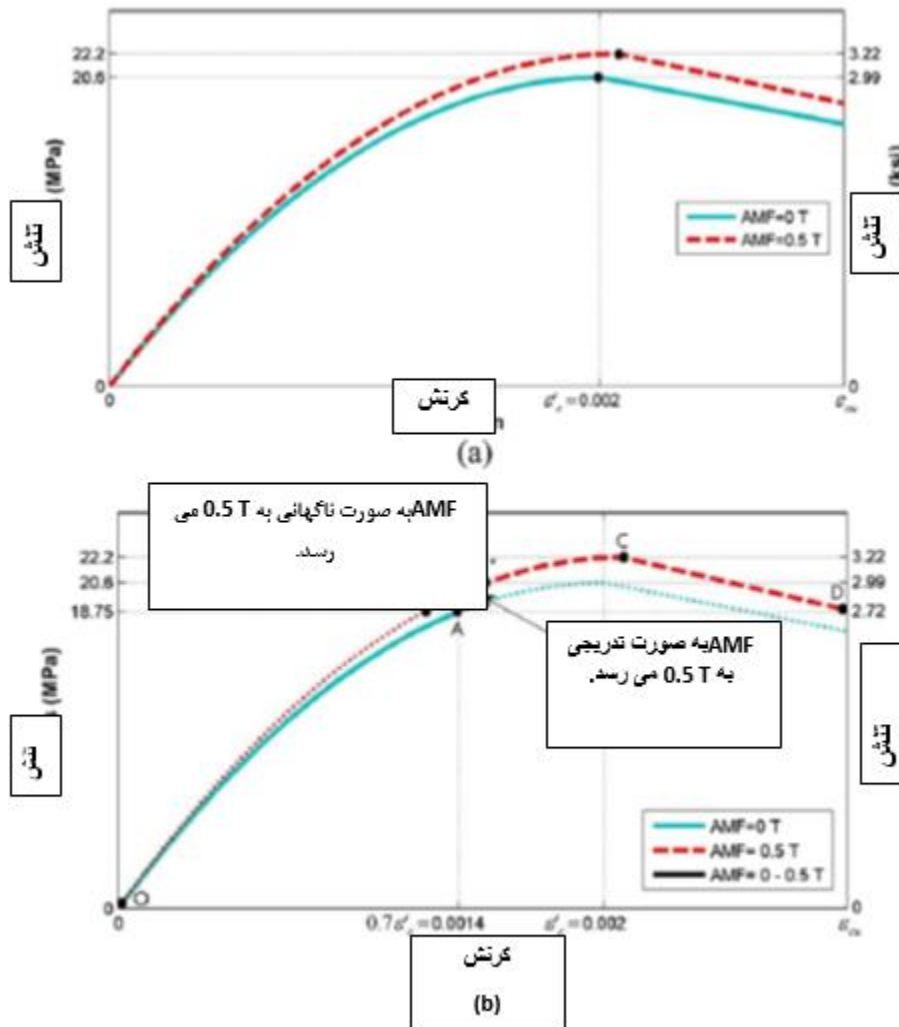
بر اساس رابطه 15 اگر  $\alpha > 1$  باشد، تنش فشاری باید به مقدار کرنش خاصی در حضور AMF دست یابد، نسبت به زمانی که AMF وجود ندارد.

بر اساس نتایج نمونه های PoM مقدار آلفا حدود 1.078 می باشد. نمودار تنش - کرنش هاگنستاد برای AMF=0 و 0.5 T (به ترتیب مربوط به نمونه های NM و PoM) در شکل 8(a) نمایش داده شده است. که در آن  $\epsilon'_c$  برای AMF=0 T برابر با 0.002 فرض شده و  $f'_c$  برای هر حالت حدوداً برابر با مقاومت مکعب بتنی آن در جدول 5 فرض گردیده است.

فرض کنید که یک سازه بتنی با سیستم کنترل هوشمند طراحی شده است، بنابراین زمانیکه کرنش یک عضو سازه ای خاص به مقداری، به عنوان مثال  $0.7\varepsilon_c$  نشان داده شده در شکل 8(a) می رسد، در معرض AMF قرار می گیرد. اگر مقدار AMF به صورت ناگهانی از 0 به 0.5T افزایش یابد، از لحاظ نظری انتظار می رود که دیاگرام از A به B ادامه یابد. اما، در واقع این امر به دلیل ترک هایی که در بتن ایجاد می گردد و همچنین رفتار پلاستیک غیرممکن می باشد. بنابراین، در این شرایط، نمودار از A به  $B'$  ادامه می یابد، که با وجود افزایش تنش میزان کرنش افزایش نیافته و یا به مقدار اندک افزایش می یابد. این نشان می دهد که مدول الاستیسیته و در نتیجه سختی بتن در این بخش بسیار زیاد می باشد. اگر مقدار AMF تا زمان دستیابی به 0.5 T به صورت تدریجی افزایش یابد، نمودار از A به نقطه ای مانند  $(B'')$  ادامه می یابد. پس از اینکه مقدار AMF در 0.5 T ثابت شد، نمودار تا زمان تخریب بتن در D ادامه می یابد.

#### • دوام تیر RC

- بر اساس نتایج مطالعات پیشین، می توان عنوان نمود که هر گونه تلاشی جهت افزایش مقاومت بتن منجر به افزایش دوام عضو RC [47-49] می شود. بنابراین استفاده از AMF در برخی از نواحی بحرانی سازه ای هوشمند مانند اتصالات تیر به ستون هایی که در معرض بارهای دوره ای هستند، می تواند سودمند باشد.



شکل 8 - (a) نمودار تنش - کرنش هاگنستاد زمانی که مقدار AMF بین 0 تا 0.5 T است، (b) اثر اعمال AMF به بتن سخت شده از  $\epsilon_c = 0.7\epsilon'_c$  به سمت رفتار سازه بتنی (توجه:  $1\text{MPa}=0.145\text{ksi}$ ).

• مقاومت لنگر اسمی

مقاومت لنگر اسمی تیر مستطیلی RC با استفاده از معادله 16 محاسبه شده است.

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left( 1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (16)$$

که در آن  $\rho$  نسبت کشش آرماتورها،  $b$  عرض تیر، و  $d$  عمق موثر تیر می باشد.

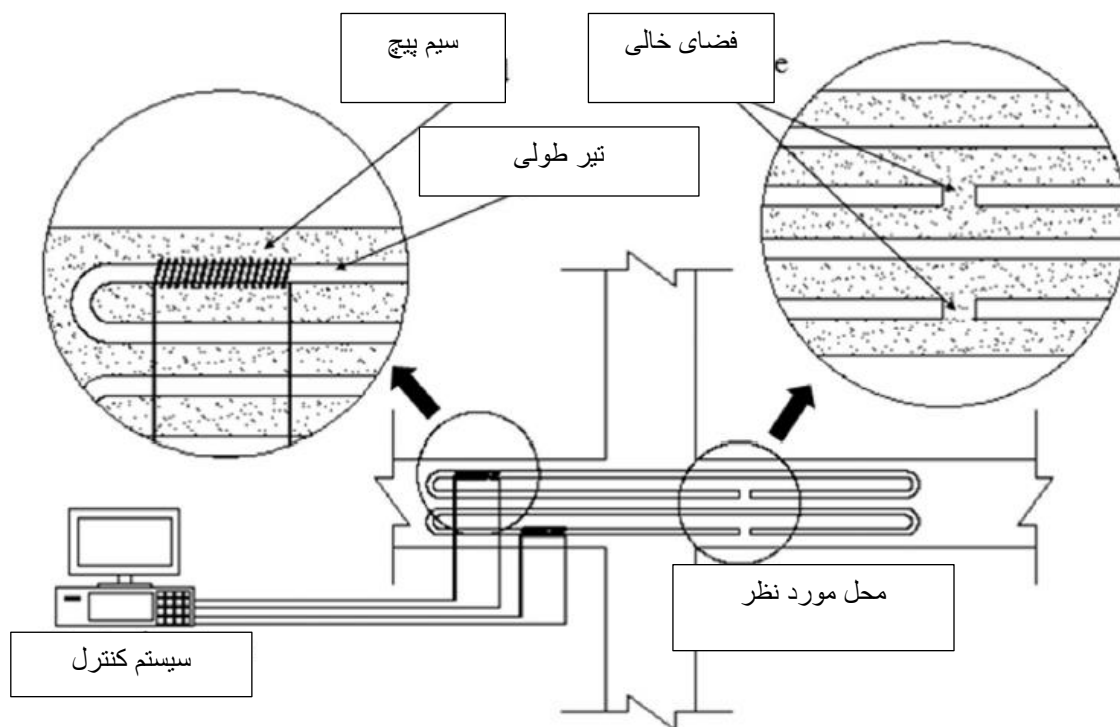
زمانیکه AMF به بتن اعمال می شود،  $f'_c$  حدوداً به  $1.078f'_c$  تغییر می کند. بنابراین مقاومت لنگر اسمی افزایش یافته و رابطه زیر بدست می آید:

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left( 1 - 0.547 \rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (17)$$

### 4.3 امکان سنجی این روش برای سازه های RC در مقیاس بزرگ

به نظر می رسد که استفاده از این روش در اعضای RC در مقیاس بزرگ به لطف وجود آرماتورهای فولادی از لحاظ عملی امکان پذیر می باشد. همان طور که عنوان شد، مقاومت مغناطیسی آهن در مقایسه با فضای خالی و یا خود بتن بسیار کم می باشد. بنابراین، برخی از انواع آرماتورهای ویژه می توانند انتخاب شوند تا شکاف (فاصله) ای را برای میدان مغناطیسی ایجاد نمایند و AMF اعمالی را به نقطه مورد نظر منتقل کرده، در حالی که به عنوان آرماتور هم عمل می کنند. این مثال به صورت شماتیک در شکل 9 نمایش داده شده است و این ایده را واضح را توضیح می دهد. با توجه به اینکه اینک این آرماتورها می توانند عملکرد دو گانه داشته باشند (انتقال AMF و تقویت)، هزینه ساخت این نسل از سازه های هوشمند خیلی بالا نمی باشد. توجه نمایید که مسئله اصلی در مورد این سازه ها، تا حد ممکن پایین نگاه داشتن نشت مغناطیسی می باشد.

استفاده از این روش امکان کنترل جابجایی و حالت شکست سازه های بتنی تحت بارهای چرخه ای (دوره ای) فراهم می آورد، به عنوان مثال فعال کردن AMF زمانیکه بارها به یک سمت اعمال شده و غیرفعال کردن آن زمانیکه به سمت مخالف وارد می شوند. از این رو به این دلیل که سختی برای جهت مخالف متفاوت می باشد، حلقه پسماند عضو به حالت غیر متقارن تغییر کرده و منجر می شود که عضو به شکل مورد نظر تغییر نماید.



شکل 9 - ساختار شکاف میدان مغناطیسی در عضو RC هوشمند.

## 5. نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصله از این مطالعه اکتشافی تحت اثر AMF با فرکانس 50 Hz و نیروی 0.5 T بر روی مقاومت فشاری بتن، نتایج زیر به دست می آیند:

اعمال AMF به مخلوط بتنی آماده دارای اثرات فرعی (جنبی) بر روی فشار می باشد.

قرار دادن بتن سخت شده در معرض AMF مقاومت فشاری آن را به میزان 7.77 درصد افزایش می دهد.

نتایج مربوط به اثر اعمال AMF به بتن سخت شده می تواند منجر به ایجاد روشی جدید برای کنترل رفتار سازه های بتنی در مقیاس بزرگ و در زمان حقیقی از طریق تنظیم سختی و دوام برخی از اعضای سازه ای ویژه، با استفاده از AMF در زمانی گردد که نیروهای دینامیکی قدرتمندی اتفاق می افتند.

استفاده از این روش برای سازه های بتنی هوشمند در برابر روش های موجود دارای مزایایی می باشد که عبارتند از: ارزان بودن، عدم نیاز به قرار دادن محرک در بتن، و عدم کاهش میزان ظرفیت باربری اعضا به دلیل نصب محرک.

- [1] L. Senff, D. Hotza, S. Lucas, V.M. Ferreira, J.A. Labrincha, Effect of nano-SiO<sub>2</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars, *Mater. Sci. Eng. A* 532 (2012) 354–361.
- [2] J.M. Ko, Y.Q. Ni, Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Eng. Struct.* 27 (12) (2005) 1715–1725.
- [3] P.C. Chang, A. Flatau, S.C. Liu, Review paper: health monitoring of civil infrastructure, *Struct. Health Monit.* 2 (3) (2003) 257–267.
- [4] C.K.Y. Leung, K.T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H.C. Wu, M. Imai, Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, *Mater. Struct.* 48 (4) (2015) 871–906.
- [5] M. Perry, Z. Yan, Z. Sun, L. Zhang, P. Niewczas, M. Johnston, High stress monitoring of prestressing tendons in nuclear concrete vessels using fibreoptic sensors, *Nucl. Eng. Des.* 268 (2014) 35–40.
- [6] G. Uva, F. Porco, A. Fiore, G. Porco, Structural monitoring using fiber optic sensors of a pre-stressed concrete viaduct during construction phases, *Case Stud. Nondestr. Test. Eval.* 2 (2014) 27–37.
- [7] B. Dong, Y. Liu, L. Qin, Y. Wang, Y. Fang, F. Xing, X. Chen, In situ stress monitoring of the concrete beam under static loading with cement-based piezoelectric sensors, *Nondestr. Test. Eval.* 30 (4) (2015) 312–326.
- [8] C.G. Karayannis, C.E. Chalioris, G.M. Angeli, N.A. Papadopoulos, M.J. Fawata, C.P. Providakis, Experimental damage evaluation of reinforced concrete steel bars using piezoelectric sensors, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 227–244.
- [9] D. Xu, S. Banerjee, Y. Wang, S. Huang, X. Cheng, Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 76 (February 2015) 187–193.
- [10] Z.D. Xu, Y.P. Shen, Y.Q. Guo, Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks, *Smart Mater. Struct.* 12 (1) (2003) 80–87.
- [11] S.H. Lim, B.G. Prusty, G. Pearce, D. Kelly, R.S. Thomson, Study of magnetorheological fluids towards smart energy absorption of composite structures for crashworthiness, *Mech. Adv. Mater. Struct.* 23 (5) (2016) 538–544.
- [12] L. Jingzhou, S. Congya, L. Qingbin, L. Fengli, W. Fengda, Theoretical investigation on natural frequency of electrorheological material based adaptive mortar beam structures using concentrated compliance method, *J. Basic Sci. Eng.* 4 (2009) 558–565.
- [13] M.M. Soleymani, M.A. Hajabasi, S. Elahi Mahani, Free vibrations analysis of a sandwich rectangular plate with electrorheological fluid core, *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng.* 5 (1) (2015) 71–81.
- [14] Q. Chen, B. Andrawe, Monotonic and cyclic experimental testing of concrete confined with shape memory alloy spirals, in: *Proceedings of 10th US National Conference on Earthquake Engineering*, July 21–25, 2014, Anchorage, Alaska, United States.
- [15] J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Mater. Des.* 56 (2014) 1078–1113.

- [16] H. Baier, Approaches and technologies for optimal control-structureinteraction in smart structures, *Trans. Built Environ.* 19 (1996) 323–335.
- [17] B.N. Agrawal, M.A. Elshafei, G. Song, Adaptive antenna shape control using piezoelectric actuators, *Acta Astronaut.* 40 (11) (1997) 821–826.
- [18] S.C. Choi, J.S. Park, J.H. Kim, Active damping of rotating composite thin-walled beams using MFC actuators and PVDF sensors, *Compos. Struct.* 76 (4) (2006) 362–374.
- [19] M.C. Ray, R. Balaji, Active structural-acoustic control of laminated cylindrical panels using smart damping treatment, *Int. J. Mech. Sci.* 49 (9) (2007) 1001–1017.
- [20] Z. Wu, X.P. Qing, F.K. Chang, Damage detection for composite laminate plates with a distributed hybrid PZT/FBG sensor network, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 20 (9) (2009) 1069–1077.
- [21] D. Mayer, H. Atzrodt, S. Herold, M. Thomaier, An approach for the model based monitoring of piezoelectric actuators, *Comput. Struct.* 86 (3–5) (2008) 314–321.
- [22] Z. Li, P.M. Bainum, Vibration control of flexible spacecraft integrating a momentum exchange controller and a distributed piezoelectric actuator, *J. Sound Vib.* 177 (4) (1994) 539–553.
- [23] E.F. Sheta, R.W. Moses, L.J. Huttshell, Active smart material control system for buffet alleviation, *J. Sound Vib.* 292 (3–5) (2006) 854–868.
- [24] L. Zhou, J. Sun, X.J. Zheng, S.F. Deng, J.H. Zhao, S.T. Peng, Y. Zhang, X.Y. Wang, H. B. Cheng, A model for the energy harvesting performance of shear mode piezoelectric cantilever, *Sens. Actuators A* 179 (2012) 85–192.
- [25] A. Messineo, A. Alaimo, M. Denaro, D. Ticali, Piezoelectric bender transducers for energy harvesting applications, *Energy Procedia* 14 (2012) 39–44.
- [26] Y. Goldfeld, O. Rabinovitch, T. Quadflieg, T. Gries, Integrated Monitoring of TRC Using Carbon Fibers, in: *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, Aachen, Germany, June 2015, pp. 327–334.
- [27] B.S.K. Reddy, V.G. Ghorpade, H.S. Rao, Effect of magnetic field exposure time on workability and compressive strength of magnetic water concrete, *Int. J. Adv. Eng. Technol.* 4 (3) (2013) 120–122.
- [28] R. Cai, H. Yang, J. He, W. Zhu, The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds, *J. Mol. Struct.* 938 (1–3) (2009) 15–19.
- [29] A.R. Soltani Todehki, H. Raeisi Vanani, M. Shayannejad, K. Ostad Ali Askari, Effects of magnetized municipal effluent on some chemical properties of soil in furrow irrigation, *Int. J. Agric. Crop Sci.* 8 (3) (2015) 482–489.
- [30] H. Afshin, M. Gholizadeh, N. Khorshidi, Improving mechanical properties of high strength concrete by magnetic water technology, *J. Sci. Iranica Trans. A* 17 (1) (2010) 74–79.
- [31] M. Gholizadeh, H. Arabshahi, The effect of magnetic water on strength parameters of concrete, *J. Eng. Technol. Res.* 3 (3) (2011) 77–81.
- [32] N. Khorshidi, M. Ansari, M. Bayat, An investigation of water magnetization and its influence on some concrete specificities like fluidity and compressive strength, *Comput. Concr.* 13 (5) (2014) 649–657.
- [33] Y.R. Tawfic, W. Abdelmoez, The influence of “water magnetization” on fresh and hardened concrete properties, *Int. J. Civil Eng. Technol. (IJCIET)* 4 (6)

(2013) 31–43.

[34] S.M. Ahmed, Effect of magnetic water on engineering properties of concrete, *J.Al-Rafidain Eng.* 7 (1) (2009) 71–82.

[35] N. Su, C.-F. Wu, Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash, *Cem. Concr. Compos.* 25 (7) (2003) 681–688.

[36] N. Su, Y.-H. Wu, C.-Y. Mar, Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag, *Cem. Concr. Res.* 30 (4) (2000) 599–605.

[37] B.S.K. Reddy, V.G. Ghorpade, H.S. Rao, Influence of magnetic water on strength properties of concrete, *Indian J. Sci. Technol.* 7 (1) (2014) 14–18.

[38] M. Kciuk, R. Turczyn, Properties and application of magnetorheological fluids, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 18 (1–2) (2006) 127–130.

[39] S.D. Nair, R.D. Ferron, Set-on-demand concrete, *Cem. Concr. Res.* 57 (2014) 13–27.

[40] J.J. Soto-Bernal, R. Gonzalez-Mota, I. Rosales, J.A. Ortiz-Lozano, Effects of static magnetic fields on the physical, mechanical, and microstructural properties of cement pastes, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015 (2015) 1–9.

[41] W. Arkadiew, Eine Theorie des elektromagnetischen feldes in den ferromagnetischen metallen, *Physik. Z.* 14 (19) (1913) 928–934.

[42] K. Küpfmüller, Einführung in Die Theoretische Elektrotechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1959.

[43] U.A. Bakshi, M.V. Bakshi, Magnetic circuits, in: *Magnetic Circuits and Transformers*, Technical Publications, India, 2008, pp. 1–48.

[44] ASTM C109/C109M-13, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

[45] ACI318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318R-14), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2014.

[46] E. Hognestad, N.W. Hanson, D. McHenry, Concrete stress distribution in ultimate strength design, *ACI J.* 52 (6) (1955) 455–479.

[47] N. Ganesan, P.V. Indira, M.V. Sabeena, Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beam-column joints under reverse cyclic loads, *Mater. Des.* 54 (2014) 686–693.

[48] R. Pendyala, P. Mendis, I. Patnaikuni, Full-range behavior of high-strength concrete flexural members: comparison of ductility parameters of high and normal-strength concrete members, *ACI Struct. J.* 93 (1) (1996) 30–35.

[49] M.A. Mansur, M.S. Chin, T.H. Wee, Flexural behavior of high-strength concrete beams, *ACI Struct. J.* 94 (6) (1997) 663–674.