

# پرینتر سه بعدی بتن و پارامترهای موثر در پرینت سازه های سیمانی

## خلاصه

با وجود اینکه بتن یک ماده متداول در صنعت ساختمان است، خودکارسازی در ساخت سازه های بتنی کم است. تکنیک های ساخت افزودنی (پرینت سه بعدی) این مشکل را می تواند حل کند. در این مقاله به بررسی مزایای استفاده از پرینتر سه بعدی بتن برای ساخت سازه ها و همچنین تشریح دستگاه [پرینتر سه بعدی](#) که بتن را به کمک روش های ساخت افزودنی و با تکنیک بستر پودر پرینت مینماید پرداخته میشود.

این پرینتر قابلیت پرینت انواع سازه ها با اشکال پیچیده را داراست و میتواند سازه ها را [با کمترین هزینه و بیشترین سرعت](#) پرینت نماید.

در این مقاله پس از تشریح چگونگی عملکرد دستگاه پرینتر سه بعدی بتن، پارامترهای موثر در کیفیت پرینت سیمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بررسی کنندگان و پژوهشگران مقاله:

پروفسور محمود فرزین عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

پروفسور داود مستوفی نژاد عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

کلمات کلیدی: پرینت سه بعدی، ساخت افزودنی، پرینتر بتن، روش بستر پودر، پرینتر سه بعدی بتن

## فهرست عناوین این مقاله:

- 1- [امکان ساخت المان های بتنی با شکل آزاد توسط پرینتر سه بعدی بتن](#)
- 2- [تکنولوژی پرینت سه بعدی و انواع روش های آن](#)
- 3- [بیشینه پژوهش در زمینه پرینت سه بعدی به روش بستریودر SLS](#)

4- دستگاه ساخته شده برای پرینت سه بعدی

5- بررسی پارامترها و شرایط پرینت سه بعدی بتن

6- قطعات بتنی پرینت شده با پرینتر سه بعدی بتن

7- نتیجه گیری

پرینتر سه بعدی بتن و پارامترهای موثر در پرینت سازه های سیمانی

## 1- امکان ساخت المان های بتنی با شکل آزاد توسط پرینتر سه بعدی بتن

با وجود اینکه بتن یک ماده متداول در صنعت ساختمان است، خودکار سازی در ساخت سازه های بتنی کم است.

تکنیک های ساخت افزودنی این مشکل را می تواند حل کند. این تکنیک ساخت تمام اتوماتیک قطعات، همراه با سفارشی سازی و ساخت اجزاء پیچیده و بدون هزینه زیاد را نوید می دهد. در مقایسه با روش های معمول، تکنیک ساخت افزودنی ( Additive manufacturing ) دارای قابلیت تولید ساختارهایی با پیچیدگی هندسی زیاد در تعداد کم، است. تکنولوژی پرینت سه بعدی فرمی از فرآیند ساخت افزودنی است که در آن قطعه از روی هم قرار دادن لایه های متوالی افقی بر روی هم ساخته می شود.

پرینت سه بعدی به روش بسترپودر امکان ساخت المان های بتنی با شکل آزاد را بدون نیاز به قالب و یا ابزار خاص فراهم می آورد.

سازه های بتنی بهینه سازی شده برای جریان نیرو یا الزامات فیزیک سازه، با این روش به راحتی قابل تولید هستند؛ ساخت افزودنی می تواند دوراهی انتخاب بین بهینه سازی هندسی سازه و افزایش هزینه تولید را حل نماید.

## 2- تکنولوژی پرینتر سه بعدی و انواع روش‌های آن

تکنولوژی پرینت سه بعدی فرمی از فرآیند ساخت افزودنی است. در این روش قطعه از روی هم قرار دادن لایه‌های متوالی افقی بر روی هم ساخته می‌شود.

بر اساس تحقیقات انجام شده دو پارامتر مهم که پروسه پرینت سه بعدی را کنترل می‌کند عبارت است از:

1- **پرینتر سه بعدی** که اندازه و سرعت پرینت و عوامل دیگر در آن مورد توجه است.

2- **ماده پرینت شونده** که مشخص می‌کند پرینتر سه بعدی چه نوع قطعه‌ای را می‌تواند تولید کند.

برای اهداف سازهای مختلف دو گروه اصلی از پرینتر وجود دارد که همه روش‌های پرینت زیرمجموعه این دو گروه قرار می‌گیرند: **روش کانتورکرفتینگ Contour Crafting** و **روش بستر پودر Particle-bed**

هرکدام از این روش‌ها برای اهداف خاصی استفاده می‌شوند و کاربردهای متفاوتی نیز دارند.

### روش کانتورکرفتینگ در پرینت سه بعدی

این روش سرعت پرینت و بهره‌وری را هدف قرار داده است. از این رو جزء پرینترهای با رزولوشن پایین است. این روش متداول‌ترین روش مورد استفاده است و به صورت ویژه به **توسعه تولید انبوه** کمک می‌کند. به دلیل **سرعت بالا** موسوم به کانتورکرفتینگ پرینت، در مقاومت ماده و شکل سازه محدودیت‌های خاصی وجود دارد. نوعی از روش کانکجت Concjet وجود دارد که عملکرد این روش مانند روش کانتورکرفتینگ متداول است و ماده پرینت به صورت خمیر تزریق می‌شود. تفاوتی که این روش با روش کانتورکرفتینگ دارد این است که در روش کانکجت لایه با ضخامت نازک‌تر و با سرعت کمتر پرینت می‌شود که اجازه استفاده از بتن با مقاومت بالاتر را می‌دهد. سرعت پایین پرینت، سدی در راه استفاده از این روش برای تولید انبوه و قطعاتی با سایز بزرگ است.

### روش بستر پودر در پرینت سه بعدی

روش بستری پودر پیچیدگی‌های پرینت شده را هدف قرار داده است. در این روش ماشین یک لایه از ذرات شن را بر روی سطح پهن می‌کند و نازل پرینتر یک نوع از چسب را بر روی محل‌هایی که لازم است صلب باشند، اعمال می‌کند. یکی از مشکلات این روش سرعت پایین آن است که برای تولید انبوه محدودیت ایجاد می‌کند. یکی از تفاوت‌هایی که این روش با روش‌های دیگر دارد، این است که در این روش ذراتی از بستر که به هم چسبیده نشده‌اند، از ذراتی که چسبیده شده‌اند حمایت می‌کنند و از

ریزش ذرات چسبیده شده جلوگیری می‌کند؛ به همین دلیل با استفاده از این روش می‌توان قطعاتی با رزولوشن بالا و پیچیدگی زیاد را تولید کرد.

## پرینت بتن به روش بستری پودر:

روش بستر پودر بر اساس ایجاد لایه مسطح خشک و تغییر در نقاط دلخواه است. پایین تر و در شکل 1 مراحل روش پرینت سه بعدی به روش بستر پودر قابل مشاهده است.

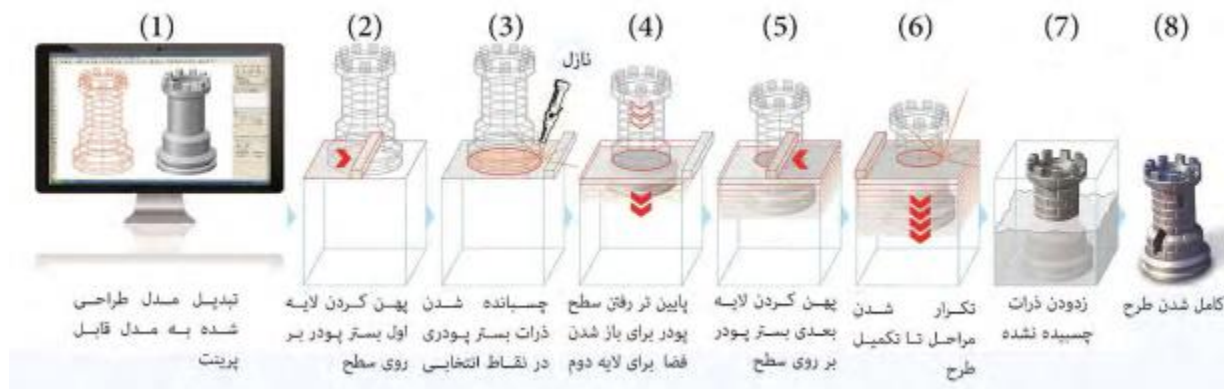
### مراحل پرینت سه بعدی بتن به روش بستری پودر:

در مرحله (1) بایستی مدل طراحی شده با استفاده از نرم افزارهای پرینت سه بعدی به مدلی قابل پرینت، تبدیل شود. نرم افزار با توجه به داده هایی که دارد، مدل را به سطوح مختلف برش می‌زند که هرکدام از این سطوح در واقع لایه‌های شن هستند که بایستی بر روی هم قرار گیرند.

بعد از اینکه مدل به دستگاه داده شد، در مرحله (2) دستگاه لایه‌ای از شن با ضخامت مشخص بر روی بستر پهن می‌کند.

در مرحله (3) نازل ماده چسب را بر روی قسمت‌هایی که بایستی به هم چسبانده شوند می‌ریزد تا لایه موردنظر الگو مربوط به خود را دریافت کند.

در مرحله (4) کفی بستر پودر پایین‌تر می‌آید تا فضا برای پهن شدن سطح جدیدی از مواد بستر فراهم آید. سپس روند پهن کردن پودر و چسباندن ذرات ادامه پیدا می‌کند تا شکل به‌طور کامل پرینت شود. در مرحله آخر شن‌های چسبیده نشده از کنار جسم پرینت شده زدوده می‌شود.

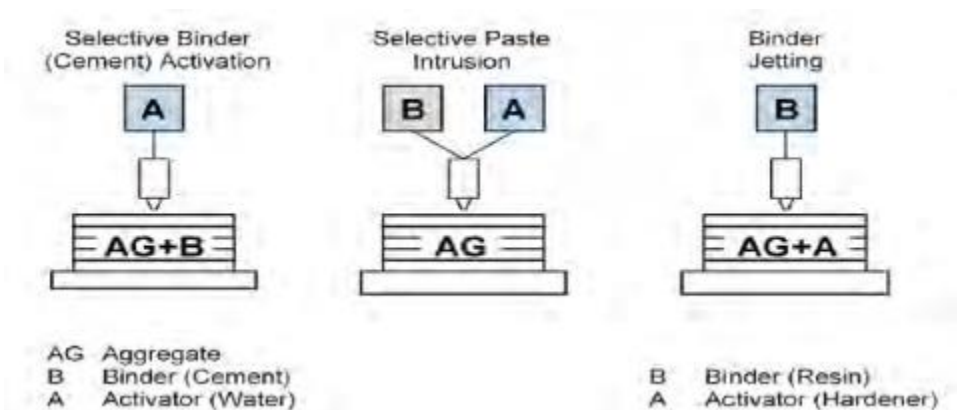


شکل 1- مراحل مختلف پرینت سه بعدی بتن به روش بستر ذرات.

## انواع تکنیک های پرینت سه بعدی بستری پودر:

بسته به موادی که برای پرینت سه بعدی استفاده می‌شود، سه تکنیک مختلف پرینت به روش بستری پودر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که عبارت اند از:

1. فعال‌سازی انتخابی چسب (Selective Binder Activation)<sup>(1)</sup>
2. نفوذ انتخابی چسب (Selective Paste Intrusion)<sup>(2)</sup>
3. جتینگ چسب (Binder Jetting)<sup>(3)</sup>



شکل 2- روش های مختلف پرینت سه بعدی بتن به روش بستر ذرات.

## فعال‌سازی انتخابی چسب

در این تکنیک، بستر پودر شامل ترکیبی از مواد دانه‌ریز (معمولاً ماسه کوچک‌تر از 1 میلی‌متر) و چسب است. در مورد قطعات بتنی، سیمان به عنوان چسب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سیمان به صورت محلی با اسپری یا جتینگ آب و یا محلول آب-افزونه به بستری پودر فعال می‌شود و یک ماتریس از جنس خمیر سیمان دور دانه‌ها تشکیل می‌دهد. [شکل 2 قسمت A](#)

## نفوذ انتخابی چسب

در این روش، بستری پودر شامل مواد دانه‌ریز (با میانگین قطر کوچک‌تر از 5 میلی‌متر) و بدون چسب است. خمیر چسب شامل سیمان، آب و افزودنی است و به وسیله نازل بر روی ذرات اعمال می‌شود. خمیر سیمان باید جاهای خالی بین ذرات را برای تولید قطعاتی با مقاومت کافی پر کند. [شکل 2 قسمت B](#)

[A](#)

## جتینگ چسب

در این تکنیک یک چسب مایع بر روی بستریودر اعمال می‌شود. وقتی که قالب پرینت شد، چسب که معمولاً رزین است، با جزء سخت‌کننده موجود در بستریودر واکنش انجام می‌دهد. [شکل 2 قسمت B](#)

>> بیشتر بدانید: [پرینتر سه بعدی چیست؟](#)

## کاربردها، مزایا و معایب پرینتر سه بعدی بتن و سیمان.

طراحی المان‌های بتنی با در نظر گرفتن نیازمندی‌های مختلف تحمیل شده از جهت زیبایی شناسی، پایداری، توانایی تحمل و انتقال نیرو، فیزیک سازه، دوام و همچنین پروسه تولید (قابلیت تولید شدن)، انجام میشود. اما معمولاً همه این نیازمندی‌ها در همه نواحی المان نباید در نظر گرفته شوند. در واقع تمرکز زیبایی شناسی بر روی شکل، سطح و قابلیت حمل نیرو، مقاومت و تغییر شکل پذیری جزئی در محل مشخصی از المان سازه ای است. درنهایت با توجه به طراحی المان‌های سازه، پرینتر سه بعدی بتن قابلیت سفارشی‌سازی را در سطح بالا به دلیل عدم وجود ابزار خاصی برای ساخت المان، اجازه میدهد.

بعلاوه تغییرات داخل یک المان یعنی سازه های طبقه‌بندی شده، می‌تواند به واسطه استفاده از این تکنیک تولید شود.

## عدم محدودیت در فرم سازه بتنی

به دلیل اینکه مجموع ذرات از لحاظ مکانیکی پایدار هستند، در مقایسه با سایر روش‌های ساخت افزودنی، استفاده از پرینتر سه بعدی بتن بستریودر، تقریباً هیچ محدودیتی در انتخاب فرم قطعه ندارد. ساختارهایی با سطوح شیب‌دار، برآمدگی‌ها، قوس‌ها، طاق‌ها، تیرهای معلق، یا تیرهای پیش آمده (سگ دست)، می‌توانند به راحتی با استفاده از این روش پرینت شوند.

## دقت و رزولوشن بالا

مزیت بعدی دقت (رزولوشن) بالای این روش حتی برای اشیاء بزرگ است. بسته به سایز ذرات دقت تا 0.1 میلی‌متر قابل دسترسی است. سرعت تولید محصول بستگی به پیچیدگی هندسی محصول دارد.

از نظر زیست‌محیطی نیز این روش دارای کارایی فراوانی است. مهندسين عمران به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی به دنبال روشی برای ساخت سازه‌ها با صرفه جویی زیاد در ماده می‌باشند. با استفاده از روش ساخت افزودنی می‌توان سازه‌های شکل آزاد را بدون نیاز به قالب یا ابزار خاص تولید کرد؛

بنابراین هزینه تولید وابسته به اندازه و پیچیدگی محصول نخواهد بود. این تکنیک می‌تواند محدوده **ساخت اشکالی با توجیه اقتصادی** را افزایش دهد و به‌عنوان مثال در زمینه ساخت نگاره‌های استاتیکی از این روش استفاده شود. مواجهه با چالش‌های اساسی زیست‌محیطی با فعالیت‌های ساخت‌وساز افزایش پیدا می‌کند. ترکیب استفاده از پرینتر سه بعدی بتن و یافته‌ها در علم مواد بتنی در این راستا می‌تواند سودمند باشد.

### **صرفه جویی و کاهش اتلاف انرژی از مزایای پرینتر سه بعدی بتن**

سازه‌های بتنی با شکل بهینه‌سازی شده می‌تواند مقدار ماده لازم را کاهش دهد و انرژی اتلافی ساختمان را کاهش دهد. بهینه‌سازی ساختار و استفاده از تکنیک‌های ساخت افزودنی ماده اولیه موردنیاز را تا 70 درصد کاهش می‌دهد.

با توجه به نشان زد زیست محیطی مشخص شده برای صنعت ساختمان ( 40 درصد انرژی جهانی ، 38 درصد نشر گازهای گلخانه‌ای، 12 درصد استفاده آب آشامیدنی جهانی ، و 40 درصد ماده جامد اتلافی در کشورهای توسعه‌یافته) و انتشار کربن دیاکسید به دلیل تولید سیمان ( 5 تا 7 درصد از مقدار کل انتشار کربن توسط انسان)، **صرفه‌جویی** در مواد نه تنها از لحاظ اقتصادی مهم است بلکه از لحاظ زیست‌محیطی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. افزون بر این، ترکیب جزئیات عملکردی یا بازشوها برای سرویس‌های ساختمان در بتن پیش‌ساخته، می‌تواند ساختمان را ساده تر کند.

علاوه بر این استفاده از پرینتر سه بعدی بتن با روش بسترپودر فرصت طراحی المان‌های بتنی را نیز فراهم می‌آورد. دستگاه‌های پرینتر سه بعدی بتن به روش بسترپودر امکان **ساخت المان‌های بتنی با شکل آزاد را بدون نیاز به قالب و یا ابزار خاص** فراهم می‌آورد. سازه‌های بتنی بهینه‌سازی شده برای جریان نیرو یا الزامات فیزیک سازه، با این روش به راحتی می‌تواند تولید شود؛ بنابراین این روش می‌تواند مشکل انتخاب بین بهینه‌سازی هندسی سازه و افزایش هزینه تولید را حل نماید.

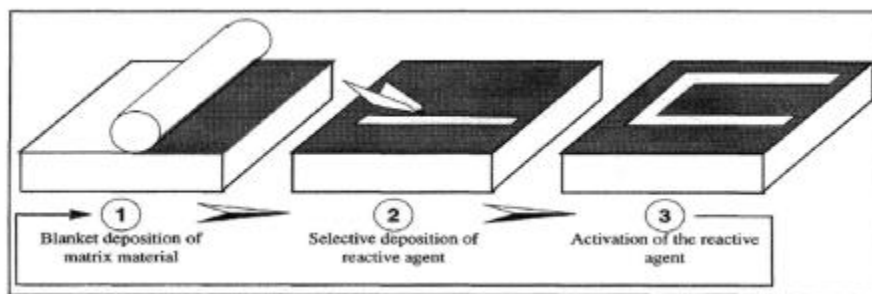
## **- 3پیشینه پژوهش در زمینه پرینت سه بعدی به روش بسترپودر**

**SLS**

در سال 1986، اولین تکنیک تولید ساخت افزودنی بر پایه بستر پودر (SLS: Selective laser sintering) لیزر برای زینتر کردن پودر فلز، پلاستیک پلیمر، یا سرامیک به منظور تولید اشیاء صلب استفاده کرد.

### اولین پیشنهاد

اولین پیشنهاد برای پرینت المان‌های بتنی توسط پگنا در 1995 ارائه شد. ارائه او ایده‌های برای تولید سازه‌هایی با شکل آزاد با استفاده از قرار دادن سیمان پرتلند بر روی بستر پودر (ماسه) در مکان انتخابی بود. با استفاده از این روش المان‌های توخالی با ابعاد  $7,6 \times 7,6 \times 15,2$  سانتی‌متر مکهب تولید شد. عامل واکنش‌دار با استفاده از بخار آب در فشار اتمسفریک بین هر لایه فعال شده و ذرات به هم فشرده می‌شدند.



شکل 3- نمایی شماتیک از مراحل روش ارائه‌شده توسط پگنا

دینی (Dini) اولین روش چسباندن انتخابی برای نمونه‌های بزرگ را ایجاد کرد که به D-Shape معروف است. این روش برای تولید نمونه‌های بزرگ بود، از یک پرینتر سه بعدی بتن با عرض 6 متر و همچنین یک هد پرینت که دربرگیرنده 300 نازل بود، استفاده می‌کرد.

در این روش نمونه‌ای که طرح آن به وسیله کامپیوتر برش داده شده است، با قرار دادن لایه‌های 5 میلی متری از شن بر روی هم و اعمال چسب در محل‌های انتخابی، ساخته می‌شود.

بعد از اتمام فرآیند تولید، ماسه مازاد زدوده شده و بر روی نمونه عملیات نفوذ به منظور افزایش مقاومت قطعه با استفاده از افزودن چسب صورت می‌پذیرد. سپس نمونه ساخته شده پولیش کاری می‌شود.

### بهبود رزولوشن و ضخامت

در سال 2010 گیبنز (Gibbons) با استفاده از ترکیبات سیمانی و با کمک تکنولوژی پرینتر سه بعدی بتن به نام پیزوالکتریک (z- 402 Z model corp) برای تولید نمونه‌هایی با ضخامت لایه 0,1 میلی‌متر استفاده کرد. اصلاح‌کننده‌های ارگانیک مانند کربوکسی‌متیل سلوز، پولی‌وینیل الکل و گلیسرین (کمتر از



5 درصد وزنی) جهت بهبود رزولوشن و دوام ساختار به پودر یا مایع اضافه شد. علاوه برافزودنی‌ها، جز اصلی پودر، سیمان زود سخت‌شونده بود و مایع واکنش‌دهنده، آب کانی‌زدایی شده بود.

## اعجوبه دیجیتال

با تمرکز بر روی طراحی هنسمیر و دلنبرگر (Hansmeyer and Dillenburg)، یک سازه با ارتفاع 3,5 متر که "اعجوبه دیجیتال" نامیده شد، ارائه کردند. این سازه با تکنیک جتینگ چسب در سال 2013 ساخته شد.

فایده این پروژه یافتن محدودیت الگوریتم پایش فرم دیجیتال بود؛ همچنین پتانسیل پرینت به روش جتینگ چسب در معماری و رزولوشن قابل‌لمس این روش را نشان داد. شرکت ووکسلجت (Voxeljet) از تکنیک جتینگ چسب بر روی بستر پودری، برای تولید المان‌های کوچک و بزرگ استفاده کرد. لایه‌ها بستر پودر بین 0,15 تا 0,3 میلی‌متر ضخامت داشتند و به ترتیب دارای رزولوشن 300 تا 600 نقطه بر اینچ بودند.

دو نوع ترکیب پودر و چسب موجود بود:

الف: شن کوارتز به عنوان بستر پودری با چسب رزین فوران یا چسب رزین فنول

ب PMMA: به‌عنوان بستر پودری در ترکیب با چسب پالیپیر.

با استفاده از چسب رزین فوران مقاومت خمشی بیشتر از 2,2 مگاپاسکال حاصل شد. با چسب رزین فنول مقاومت خمشی بین 2,5 تا 5 مگاپاسکال به دست آمد. ترکیب پالیپیر با PMMA (Methyl methacrylate) مقاومت کششی تا 4,3 مگاپاسکال ایجاد می‌کرد. تکنولوژی جتینگ چسب می‌تواند برای ساخت قالب‌های شکل آزاد بتنی مورد استفاده قرار گیرد.

## تقویت محدوده انتخابی در پرینت سه بعدی

سال 2014 فرام (Fromm)، ایده ای را برای تقویت محدوده انتخابی از المان‌های سمندی، با ایجاد کاواک‌های لوله مانند (Tube-like cavities) منتشر کرد. مرحله دوم بعد از پایان فرآیند پرینت و زدودن شن اضافی، گودی‌ها می‌تواند با پلاستیک یا فلز مذاب، به منظور تقویت جسم پرشوند.

در ادامه ایجاد روش‌های جدید طراحی با استفاده از دستگاه پرینتر سه بعدی بتن، رل و سان فرتلو (Real and San Fratello) پژوهشی را با عنوان "خانه پرینت سه بعدی شده" در سال 2013 ارائه کردند.

در این پروژه یک پرینتر سه بعدی بتن باید اجزاء کوچکی را پرینت می‌کرد که ترکیب آن‌ها یک خانه کامل را ایجاد می‌کرد. سطح بیرونی خانه باید به وسیله روش چسباندن انتخابی و با استفاده از پلیمر سیمان تقویت شده با الیاف، ساخته می‌شد. بعلاوه بعضی از اجزاء داخلی باید با استفاده از ترکیب پلیمر نمکی قابل پرینت سه بعدی ساخته می‌شد.

### تأثیر نسبت آب به سیمان در مقاومت سازه

اولین پژوهشی که بر روی تکنولوژی ماده برای تکنیک چسباندن انتخابی تمرکز کرد، توسط لوک (Lowke) در سال 2015 صورت گرفت. ایشان به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان ( $W/C^7$ ) بر روی مقاومت المان‌های تولید شده با تکنیک فعال سازی انتخابی سیمان پرداختند. در این روش المان‌های سیمانی، با به کار بردن محلول آبی بر روی ترکیب دانه‌های ریز سیمان (دانه‌های کوچک‌تر از 0,5 میلی‌متر) تولید می‌شدند. ضخامت لایه بین 1 تا 3 میلی‌متر قرار داشت. مقاومت فشاری و همچنین مقاومت خمشی با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش پیدا کرد.

لوک این اتفاق را به پخش ناهمسان آب در لایه وابسته دانست. در قسمت‌هایی با درصد رطوبت کم، از آبیوشی (Hydration) سیمان جلوگیری می‌شود که استحکام ضعیف لایه را نتیجه می‌دهد. با افزایش نسبت آب به سیمان نفوذ آب در لایه افزایش می‌یابد که در نتیجه اتصال و مقاومت لایه افزایش می‌یابد.

ویگر (Weger) روش دیگر چسباندن انتخابی با عنوان نفوذ انتخابی خمیر (Selective paste intrusion) در سال 2016 شرح داد. این روش از سیال خمیر سیمان و لایه ای از ذرات (قطر میانگین کمتر و یا مساوی 3 میلی‌متر) برای تولید المان‌های بتنی استفاده کرد. ضخامت لایه پرینت سه میلی‌متر بود. مقاومت فشاری نمونه آزمایش استوانه‌ای با قطر 50 میلی‌متر و ارتفاع 51 میلی‌متر در نسبت آب به سیمان معادل 0,4 ، 22,1 مگاپاسکال به دست آمد.

### وابستگی مقاومت به پرشدگی لایه

بررسی‌ها وابستگی مقاومت به پرشدگی لایه که خود وابسته به پارامترهای روانه شناسی خمیر تازه است را نشان می‌داد. بعد از این پژوهش ویگر در سال 2018 به مقاومت فشاری تا 70 مگاپاسکال بعد از 7 روز برای مکعب با ابعاد 100 میلی‌متر که با روش نفوذ انتخابی چسب ساخته شده بود دست پیدا کرد. ضخامت لایه 3 میلی‌متر و نسب آب به سیمان خمیر سیمان 0,3 بود.

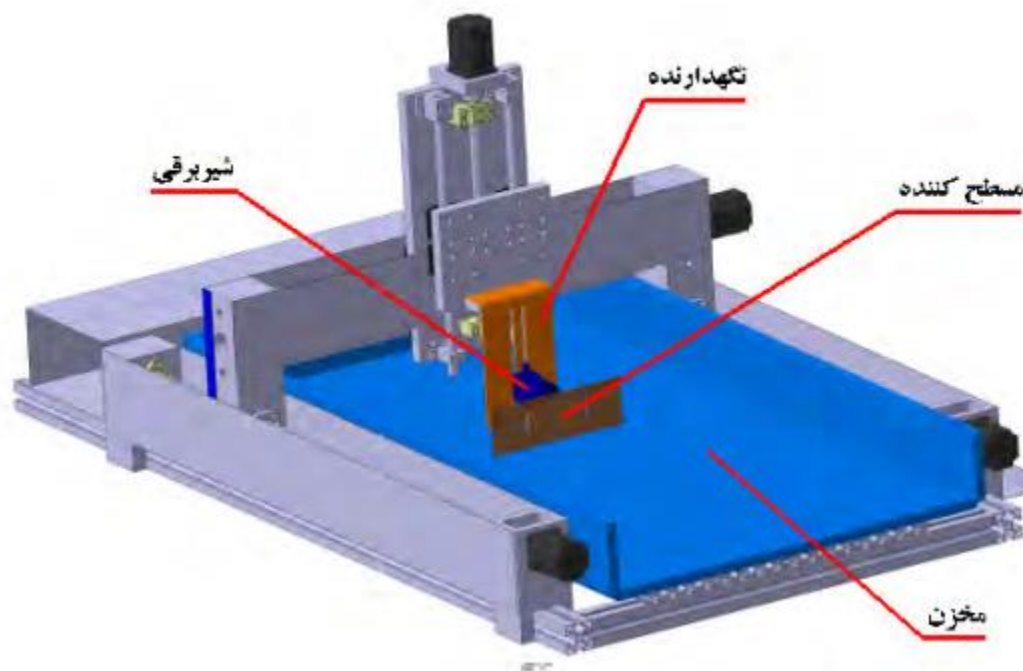
ویژگی‌هایی که مربوط به دوام است نیز مورد بررسی قرار گرفت. نمونه هیچ آسیبی بعد از 28 روز سیکل فریز کردن-آب شدن، ندید و هیچ آمیختگی با کربن بعد از 28 روز قرار دهی در  $CO_2$  با غلظت 2 درصد نشان نداد.

### تکنولوژی پمپ پیزوالکتریک

در سال 2017 شاکر ( Shakor et al ) از پرینتر سه بعدی بتن با تکنولوژی پمپ پیزوالکتریک برای تولید نمونه در بستر پودر سمنتی استفاده کرد. جزء اصلی پودر سمنتی، سیمان پرتلند معمولی (OPC) با درصد 30,8 درصد، 64,7 درصد سیمان کلسیم آلومینات (CAC) و 4,5 درصد لیتیم کربنات به منظور تسریع زمان گیرش بود. فاز مایع از آب و 5 تا 10 درصد پلیوینیل الکل یا گلیسرین یا متانول ( 20 درصد حجمی از چسب) تشکیل شده بود. نمونه مکعبی با ابعاد 20\*20\*20 میلی متر مکعب با مقادیر مختلف آب تولید شد. نتایج نشان می داد که با افزایش آب نمونه پرینت شده، مقاومت فشاری بعد از 28 روز کیورینگ در آب از 3,1 تا 8,3 مگاپاسکال افزایش می یابد. نتایج، پدیده افزایش مقاومت با افزایش نسبت آب به سیمان که توسط لوک ارائه شده بود را تایید می کرد.

## 4- پرینتر سه بعدی ساخته شده برای بتن

با توجه به بررسی پارامترها در پرینتر دو بعدی، به منظور پرینت قطعه ای سه بعدی نیاز به اصلاح دستگاه پرینتر دو بعدی و یا استفاده از دستگاه دیگر است. به همین منظور، دستگاه سی ان سی سه محوره ای تدارک دیده شد. قسمت های مختلف دستگاه از جمله کنگی آن و همچنین سیستم الکتریکی آن مورد اصلاح قرار گرفت تا امکان استفاده از این دستگاه به عنوان **پرینتر سه بعدی بتن** فراهم آید. نمایی از دستگاه اصلاح شده در شکل 4 مشخص است.



شکل 4- نمایی از سی ان سی سه محوره اصلاح شده

در شکل 5 نمایی نزدیک از کلگی دستگاه قابل مشاهده است. کلگی و مسطح کننده با استفاده از ورق گالوانیزه با ضخامت 2 میلی‌متر ساخته شده است. جنس مخزن، از فومیزه است. به منظور افزایش دقت پاشش نازل بلافاصله بعد از شیربرقی قرار گرفته است.

این دستگاه دارای مشکلاتی از قبیل سرعت کم حرکت است که نهایتاً امکان کنترل دلخواه پارامترها را بسیار محدود می‌نماید.



شکل 5- نمایی نزدیک از قسمت کلگی

## مسطح سازی سطح

یکی از مهم‌ترین نکاتی که بایستی در عملکرد پرینتر بتن در نظر گرفته شود، نحوه مسطح‌سازی سطح است. مسطح سازی به صورت خودکار و با حرکت خط کش مسطح کننده در طول پرینتر انجام می‌شود. ارتفاع خط کش پس از پرینت هر لایه به میزان دلخواه (معادل ضخامت انتخابی لایه‌ها) و به صورت خودکار بالاتر می‌آید. تنظیم ارتفاع خط‌کش با تغییر در جی کد خروجی انجام می‌شود.

## جی کد نویسی پرینترهای سه بعدی بتن

نرم افزار کنترلی دستگاه، ماخ تری است. یکی از مشکلاتی که در استفاده از ماخ تری وجود دارد عدم کنترل ولتاژ ورودی به پمپ است. به همین دلیل از برد آردوینو به عنوان برد رابط بین ماخ تری و پمپ استفاده شد. دبی پمپ با استفاده از آردوینو تنظیم می‌شود و سپس با استفاده از رله‌ای که به منظور روشن خاموش شدن پمپ به برد اصلی متصل شده است خاموش و روشن می‌گردد. برای خاموش و روشن کردن پمپ از کدهای M08 و M09 که به منظور روشن و خاموش کردن آب صابون در دستگاه‌های سی‌ان‌سی مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شده است.

## تفاوت جی کد پریتر سه بعدی با دستگاه سی ان سی

جی کد [پریترهای سه بعدی](#) با جی کد دستگاه‌های سی ان سی کمی متفاوت است. جی کد استفاده شده به منظور پرینت قطعات استفاده از نرم افزار cura 4.0 که نرم افزاری جامع در زمینه جی کد نویسی پریترهای سه بعدی است، استخراج می‌شود. به دلیل نوع جی کد خروجی و محدودیت‌های نرم افزار و الگوریتم آن، اصلاحات فراوانی بایستی بر روی جی کد صورت می‌گرفت. اولین اصلاح مربوط به روشن و خاموش شدن پمپ است.

جی کد خروجی نرم افزارهای پرینت سه بعدی، به منظور پرینت قطعات، در قسمت‌هایی که لازم نیست ماده استفاده شود از کد E استفاده می‌کند که بیانگر اکسترودر است. این کد برای نرم افزار ماختری ناشناخته است و بایستی اصلاح شود. به همین منظور تمام کدهای E، از جی کد خروجی به صورت دستی حذف شده و به منظور قطع و وصل کرد پمپ و شیربرقی در قسمت‌های موردنیاز از M08 و M09 استفاده شد.

یکی دیگر از مشکلات موجود، عدم توقف کلگی از لایه‌ای به لایه دیگر است. به منظور حل این مشکل کد M00 مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد این کد توقف اجباری فرآیند و شروع اختیاری است. قبل از هر لایه 4 بار از این کد استفاده می‌شود تا بتوان دو بار به صورت رفت و برگشت سطح بتن را مسطح کرد. بعد از پرینت یک لایه به منظور صاف کردن بستر پودر خط‌کش به میزان ضخامت لایه‌ها بالاتر می‌آید. به منظور بالاتر آمدن خط کش، بعد از هر لایه کدی قرار داده شده است که وظیفه این کد تنظیم ارتفاع لایه بعدی نسبت به لایه فعلی و مسطح‌سازی سطح است.

## - 5 بررسی پارامترها و شرایط پرینت سه بعدی بتن

### نسبت آب به سیمان

یکی از پارامترهای مهمی که نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت بتن دارد، نسبت آب به سیمان است. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، با وجود اینکه نسبت آب به سیمان جهت گیرش بتن 0,25 است، اما در عمل نسبت آب به سیمان برای بتن معمولاً بین 0,4 تا 0,6 در نظر گرفته می‌شود تا روانی آن به حد مطلوب برسد و استفاده از آن در محیط کارگاه به آسانی صورت پذیرد. در پروژه حاضر، با توجه به اینکه روانی بتن کارایی خاصی در روند پروژه ندارد، استفاده از نسبت آب به سیمان کمتر از 0,4 نیز امکان‌پذیر است.

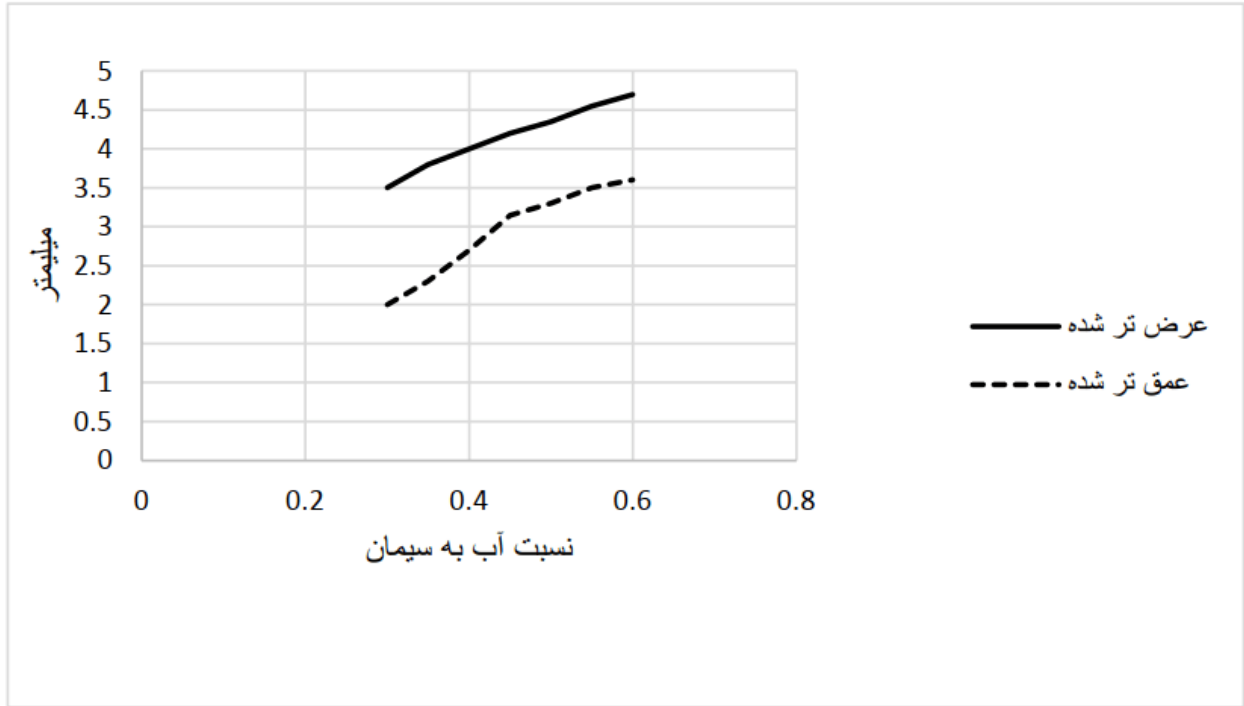
به منظور بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی کیفیت قطعه کار، آزمایشی طراحی شد که در آن نسبت آب به سیمان به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شد و الگو، عرض و عمق ترشدگی تحت ارزیابی

قرار گرفت. از 7 نسبت آب به سیمان مختلف به منظور انجام آزمایش‌ها استفاده شد. حداکثر اندازه ذرات شن استفاده شده 0,3 و فشردگی با استفاده از فشاری معادل 300 پاسکال صورت پذیرفت.

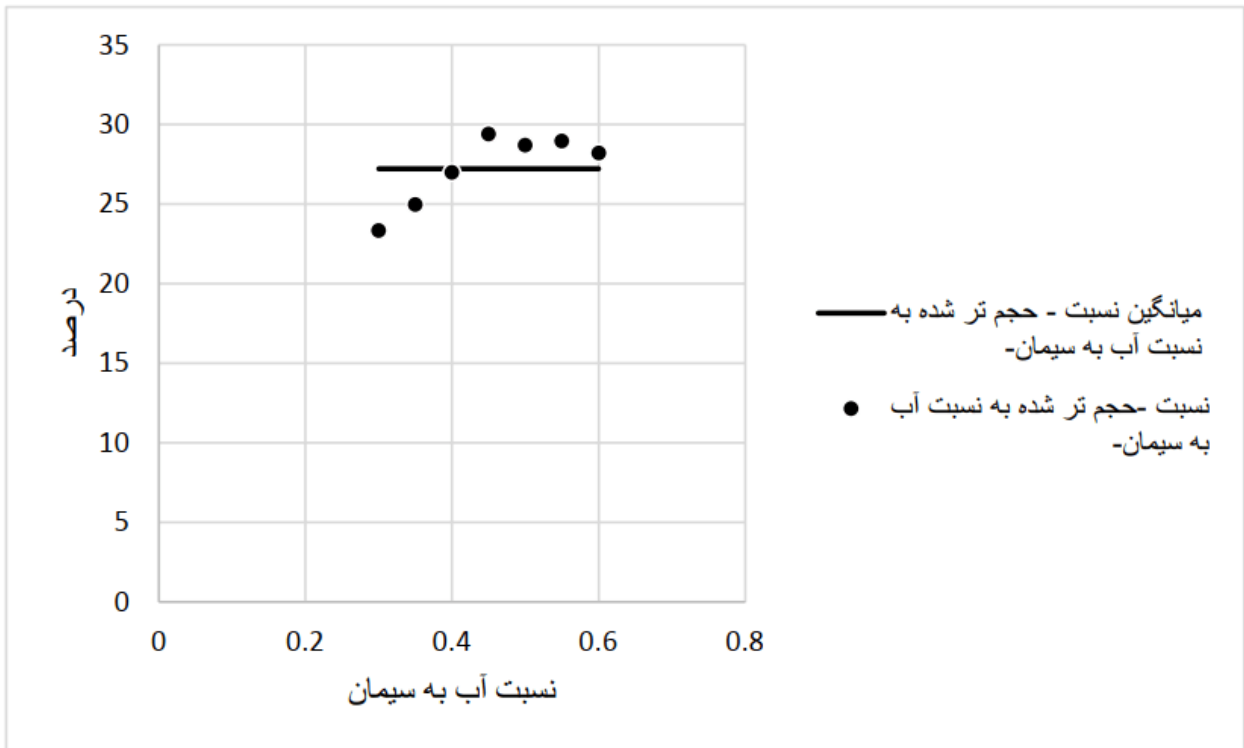
در شکل 7 و شکل 6 می‌توان تأثیر نسبت آب به سیمان در مقدار نفوذ در عرض و عمق را مشاهده کرد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول 1 گزارش شده است.

**جدول 1- خلاصه‌ای از نتایج آزمون تأثیر دبی در میزان نفوذ**

نسبت آب به سیمان عمق	عرض	نسبت (حجم تر شده به نسبت آب به سیمان)	نسبت مقدار نفوذ در عرض به مقدار نفوذ در عمق
0,3	2	23,33	1,75
0,35	2,3	24,97	1,65
0,4	2,7	27	1,48
0,45	3,15	29,4	1,33
0,5	3,3	28,71	1,32
0,55	3,5	28,96	1,3
0,6	3,6	28,2	1,31
میانگین		27,22	1,45



شکل 6- نمودار بررسی عرض و عمق تر شده



شکل 7- نمودار بررسی حجم تر شده

## تشریح نسبت موثر در حجم تر شده

همان‌طور که از جدول 1 و شکل 6 برمی‌آید، هرچه دبی بیشتر باشد نفوذ در عمق و عرض بیشتر خواهد بود؛ یعنی نفوذ رابطه مستقیم با دبی دارد؛ البته نسبت حجمی از بتن که تر می‌شود، به نسبت آب به سیمان اعمال شده بر روی بستر، تغییر چندانی نمی‌کند و تقریباً ثابت است؛ یعنی هرچه نسبت آب به سیمان افزایش یابد به همان نسبت حجمی که تر خواهد شد افزایش خواهد یافت.

یکی دیگر از نکاتی که به طور مشهود مشخص است این است که همواره نفوذ در عرض بیشتر از نفوذ در عمق خواهد بود. میانگین نسبت نفوذ در عرض نسبت به نفوذ در عمق نیز برابر 1,4 است که بیشتر بودن نفوذ در عرض را نشان می‌دهد.

>> بیشتر بدانید: [پرینت سه بعدی خانه و ساختمان](#)

## اندازه ذرات استفاده شده در پرینت

از عواملی که بر روی کیفیت، دقت و استحکام سازه پرینت شده بسیار مؤثر خواهد بود، اندازه دانه‌های مورد استفاده است.

دانه‌هایی با اندازه ریز سطح مقطع بیشتری نسبت به حجم خود دارند. در نتیجه، خمیر سیمان به دلیل بیشتر شدن سطح مشترک دانه و سیمان نیروی چسبندگی نهایی بیشتری ایجاد خواهد کرد. البته مواد دانه ریزتر به دلیل اینکه خلل و فرج کمتری را تولید می‌کند مصرف مصالح را بالاتر می‌برند.

به منظور بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها بر الگو ترشدگی، سه نوع بستر با حداکثر اندازه دانه متفاوت در ترکیب با سه دبی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. سرعت حرکت کلگی و میزان فشرده‌سازی ثابت در نظر گرفته شد. در سرعت حرکت کلگی و دبی ثابت، نسبت آب به سیمان ثابت خواهد ماند.

نتایج این آزمایش و نحوه تأثیر میزان پاشش و حداکثر اندازه دانه پودر بر الگو ترشدگی در شکل 8 مشخص است. تصاویر با تصویر برداری از محلی معین نسبت به بستر (فاصله یکسان نسبت به بستر پودر و عمود بر سطح آن)، ثبت شده است. دبی خروجی نازل به منظور جلوگیری از تأثیر املاح موجود بر میزان آن قبل از هر آزمون مجدداً اندازه‌گیری می‌شد و در صورت مغایرت با دبی مد نظر از نو تنظیم می‌گشت.

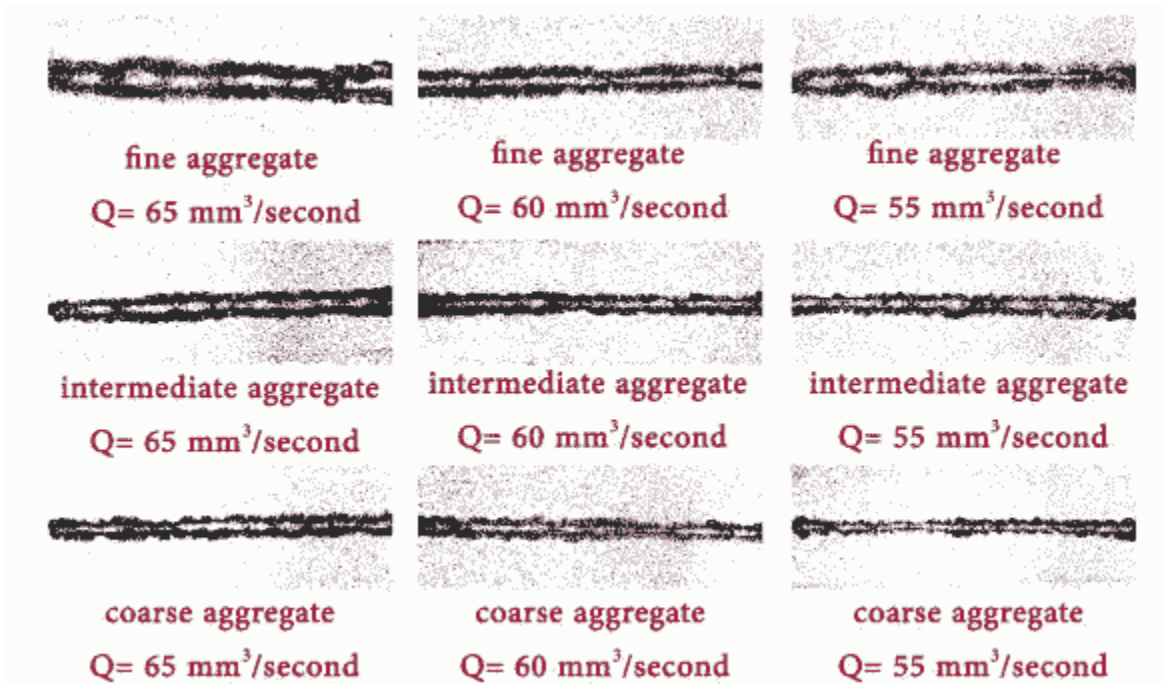
**دانه بندی های درشت، متوسط و ریز**



ترکیب اندازه دانه‌ها بر اساس نمودار دانه‌بندی اصلاح‌شده ذکرشده در فصل سوم و با استفاده از منحنی دانه‌بندی استاندارد بتن تعیین شده است. سه گروه دانه‌ای متفاوت با حداکثر اندازه دانه 600 (دانه‌بندی درشت)، حداکثر اندازه دانه 300 (دانه‌بندی متوسط) و حداکثر اندازه دانه 150 (دانه‌بندی ریز) تحت آزمون قرار گرفته‌اند.

همان‌طور که در شکل 8 می‌توان ملاحظه کرد دانه‌هایی با اندازه ریز باعث عرض ترشده‌گی بیشتر نسبت به دانه‌هایی با اندازه متوسط و درشت می‌شوند. علت این امر نفوذ سخت‌تر آب در بین دانه‌های ریز است که به سبب کمتر بودن فضای خالی بین دانه‌ها حاصل می‌شود.

در مقابل بستر با دانه‌های درشت به دلیل بیشتر بودن خلل و فرج، آب را راحت‌تر به سمت عمق به سبب فضای خالی بیشتر هدایت می‌کنند و در نتیجه عرض تر شده کمتر خواهد بود. الگو ترشده‌گی دانه‌های ریز و متوسط اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند در حالی که دانه‌های درشت الگوی ترشده‌گی کاملاً نامنظمی را از خود نشان می‌دهند. احتمالاً علت این پدیده برخورد مایع به ذرات درشت ماسه در حین نفوذ در عرض است. این ذرات به دلیل نوع ماهیت خود باعث کاهش نفوذپذیری می‌شوند.



شکل 8- الگو ترشده‌گی بسترهای پودر با حداکثر اندازه دانه و دبی متفاوت

جدول 2-تأثیر دانه‌بندی در میزان نفوذ و الگو ترشدگی بستر پودر

نوع دانه‌بندی	دبی	پارامتر	آزمایش‌ها				میانگین		
ریز	55	عرض	5,9	4,35	4,2	4	4,8	4,65	
		ارتفاع	1,9	1,4	1,6	1,75	1,35	1,6	
	60	عرض	5,05	4,7	4,55	5,05	4,15	4,7	
		ارتفاع	1,9	1,6	1,65	1,65	1,95	1,75	
	65	عرض	4,85	5,1	4,25	4,7	5,6	4,9	
		ارتفاع	1,75	1,75	1,9	1,8	1,8	1,8	
	متوسط	55	عرض	3,65	3,35	3,85	3,45	3,7	3,6
			ارتفاع	2,1	1,9	2,1	1,85	2,05	2
		60	عرض	3,8	3,9	3,55	3,7	3,3	3,65
			ارتفاع	2,4	2,15	2,2	2,05	2,45	2,25
		65	عرض	4	3,5	3,85	3,85	4,05	3,85
			ارتفاع	2,45	2,45	2,35	2,5	2	2,35
درشت		55	عرض	2,7	1,85	2,8	2,15	2,5	2,4
			ارتفاع	3,05	3,45	3,15	3,35	3	3,2
		60	عرض	2,7	2,15	2,25	2,4	3	2,5
			ارتفاع	3,5	3,7	3,15	3,15	3,5	3,4
		65	عرض	2,25	2,95	2,45	2,55	3,05	2,65
			ارتفاع	3,95	3,7	4	3,35	3,25	3,65

### تأثیر نسبت درصد حجمی ماسه و سیمان

به‌منظور بررسی دقیق تأثیر میزان سیمان بر روی بتن، آزمایش دیگری انجام شده است. نسبت حجمی ماسه به بتن به عنوان پارامتر متغیر و نسبت آب به سیمان، سرعت حرکت نازل و اندازه ذرات مورد آزمون، به‌عنوان پارامتر ثابت در نظر گرفته شد. با کاهش نسبت حجمی ماسه به بتن، حجم ماسه

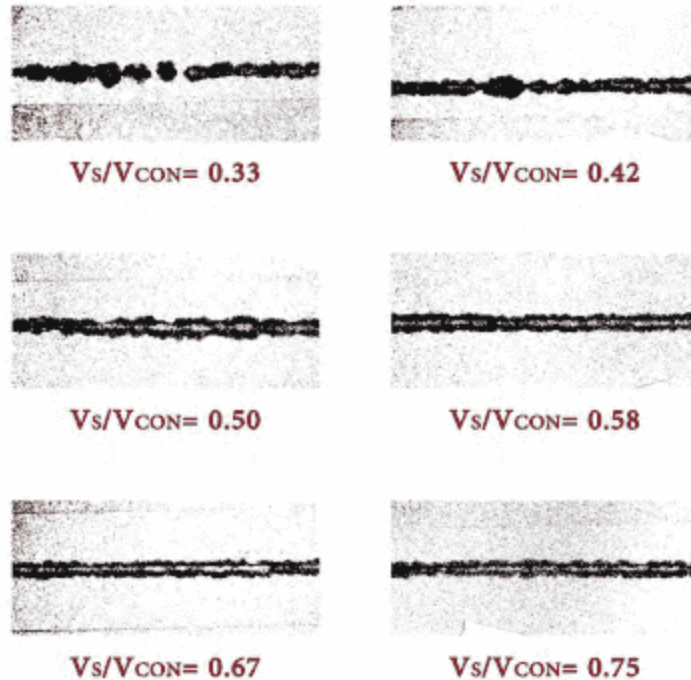
مورد استفاده کاهش پیدا کرده و این حجم کاهش پیدا کرده با افزایش حجم سیمان و آب جبران می‌شود تا حجم کل بتن تولید شده ثابت بماند.

آزمایش‌ها با در نظر گرفتن 6 مقدار مختلف برای نسبت حجمی مایع به بتن انجام شده است. حداکثر نسبت حجمی ماسه به بتن برابر با حداکثر مقدار ذکر شده در استانداردها که در فصل دوم و سوم مورد بررسی قرار گرفت است. نسبت جرمی آب به سیمان، 0,35 و حداکثر اندازه ذرات ماسه 0,3 است.

**نتایج آزمایش در شکل 9 و جدول 3 قابل مشاهده است.**

**جدول 3- بررسی تأثیر نسبت حجمی ماسه به بتن بر مقادیر ترشدگی متوسط**

نسبت حجمی ماسه به بتن	عرض	ارتفاع	حجم تر شده
0,33	3,80	1,75	6,65
0,42	3,75	1,75	6,56
0,50	3,85	1,90	7,32
0,58	3,75	2,00	7,50
0,67	3,60	1,95	7,02
0,75	3,30	2,20	7,26



شکل 9- تاثیر نسبت حجمی ماسه به بتن بر روی الگو پاشش

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که نظم الگو ترشدگی از نسبت ماسه به بتن پیروی می‌کند. پس با افزایش نسبت ماسه به بتن و در نتیجه کاهش مقدار سیمان موجود در بستر، الگو ترشدگی "منظم‌تر" شده است.

البته در نسبت حجمی (0,75) الگو نسبت به نسبت حجمی (0,67) "نامنظم تر" شده است. و علت این امر احتمالاً به دلیل زیاد بودن مقدار ماسه و در نتیجه تأثیرگذاری این مهم بر روی الگو پاشش به واسطه نفوذپذیری کم ماسه بوده است.

با افزایش نسبت حجمی، عرض ترشدگی کاهش یافته و ارتفاع افزایش پیدا کرده است. این افزایش ارتفاع احتمالاً به دلیل کمبود سیمان است که نفوذ کندتر آب در عرض و نفوذ بیشتر در عمق را نتیجه می‌دهد.

در دو نسبت 0,33 و 0,42 پاشش سیمان به اطراف مشاهده شد که به علت زیاد بودن سیمان موجود در سطح و چگالی پایین سیمان است.

نسبت حجمی مناسب به منظور پرینت با توجه به نظم الگو پاشش نسبت 0,58 و 0,67 است. منظم بودن هرچه بیشتر الگو پاشش دقت بیشتر قطعه نهایی را نتیجه خواهد داد.

**نکات نتایج آزمایش**

## جابه جایی ذرات سیمان هنگام تزریق آب

1 هنگام تزریق آب به بستر، به دلیل وزن پایین ذرات سیمان، سیمان از یک قسمت به قسمت دیگر منتقل می‌شود؛ یعنی به دلیل کشش سطحی آب در بعضی از نقاط، آب تمایل به جمع شدگی و تشکیل قطره بزرگ‌تر را دارد و این تمایل به جمع شدگی و حرکت آب، باعث جابه‌جایی ذرات سیمان از یک نقطه به نقطه دیگر می‌شود. در نتیجه فضای حجم سیمان جابه‌جا شده خالی می‌شد که در نهایت باعث پایین آمدن دقت قطعه خواهد شد.

## سرعت خروجی آب از نازل

۲ سیمان در سرعت بالای پاشش، به اطراف پراکنده می‌شود که علت این امر چگالی پایین ذرات سیمان است.

به همین دلیل لازم است دبی خروجی آب از نازل را کاهش داد همان‌طور که قبلاً اشاره شد هرچه دبی خروجی آب کاهش پیدا کند برای رسیدن به مقدار معین نسبت آب به سیمان بایستی سرعت حرکت نازل کاهش پیدا کند که این کاهش سرعت حرکت نهایتاً باعث کاهش سرعت پرینت بتن خواهد شد.

## فشرده سازی بستر

3 به منظور حل دو مشکل بالا از فشرده کردن بستر پهن شده استفاده شد. در این حالت مشاهده گردید که با کوچک‌ترین اختلاف در میزان فشرده‌سازی میزان نفوذ آب در سیمان تحت تأثیر قرار می‌گیرد و آب در قسمت‌های فشرده‌تر با سرعت بیشتری نفوذ می‌کند که این امر باعث کاهش بسیار شدید دقت می‌شود. در واقع الگو ترشدگی سیمان خالص به میزان فشرده‌سازی بستر پودر بسیار وابسته است و با کوچک‌ترین اختلاف در میزان فشرده‌سازی، نامنظمی در الگو پاشش بیشتر خواهد شد.

## ناخالصی و بی‌نظمی

4 در صورتی که ناخالصی کوچکی در ترکیب سیمان وجود داشته باشد و این ناخالصی در مسیر پاشش قرار گیرد باعث انحراف شدید جریان نفوذ آب در بتن می‌شود که دقت را به شدت کاهش می‌دهد. از طرفی تهیه سیمان بدون هیچ ذره اضافه و نگهداری آن را مشکل می‌کند که نهایتاً باعث دشوارتر شدن پرینت قطعه می‌شود. در حالتی که سیمان با ماسه ترکیب شده باشد، ذرات ماسه خود نقش این ذرات اضافه را ایفا خواهند کرد اما چون ذرات ماسه به صورت همگن در پودر پخش شده اند تأثیر فراوانی از نظر ایجاد بی‌نظمی در الگو ترشدگی نخواهند داشت.

## سرعت نفوذ آب در سیمان

۵ سرعت نفوذ آب در سیمان نسبت به بتن بسیار بیشتر است که این امر علتی برای کاهش دقت ابعادی دقت نهایی خواهد بود.

### چگالی سیمان

۶ سیمان قطعه‌ای چگال‌تر نسبت به بتن تولید می‌کند که دلیل این امر چگالی بالا سیمان و فشرده شدن بیشتر آن نسبت به بتن است. در نتیجه اگر یک قطعه از جنس سیمان تولید شود نسبت به همان قطعه از جنس بتن وزن بیشتری خواهد داشت.

## - 6 قطعات بتنی پرینت شده با پرینتر سه بعدی بتن

قطعه پرینت شده اول مربوط به دیواری است که در میان آن پنجره ای قرار دارد.



شکل 10- نمایی از قطعه پرینت شده شماره 5

قطعه پرینت شده دوم، قایقی به عرض 12 سانتی متر طول 32 سانتی متر و ارتفاع 10 سانتی متر است.

با توجه به اینکه عملکرد فرآیند در پرینت دوبعدی قطعات بسیار مناسب بود، در راستا ارتفاع فرآیند و بررسی هر چه بیشتر توانمندی‌های آن، قطعه‌ای سه بعدی طراحی شد تا با استفاده از پرینتر سه بعدی (سی‌ان‌سی سه محوره اصلاح شده) قطعه پرینت گردد.

یکی از مشکلات موجود در پرینت این قطعه عدم تناسب سرعت کلگی دستگاه با دبی خروجی پمپ و نازل بود. پمپ دارای محدودیتی برای دبی خود است. این محدودیت به واسطه عدم پایداری پاشش نازل در دبی‌های کم پمپ است.

از طرف دیگر، حداکثر سرعت حرکت کلگی دستگاه به دلیل مشخصات ساخت، کم است. به همین دلیل امکان دستیابی به مقادیر کم آب به سیمان عملاً میسر نیست و محدودیت شدیدی در انتخاب نسبت آب به سیمان وجود دارد.

در شکل 11، می‌توان نمایی از قایق پرینت شده را مشاهده کرد.



شکل 11- نما از کنار قایق پرینت شده

## - 7 نتیجه گیری

1. عدم وجود فشار باعث ایجاد خلل و فرج فراوان در داخل قطعه نهایی پرینت شده میشود. هر چه ذرات استفاده شده دارای دانه بندی درشت‌تری باشند، خلل و فرج بیشتری ایجاد خواهد شد.

نتیجه ایجاد خلل و فرج، کاهش کیفیت سطح قطعه بتنی پرینت شده و کاهش مقاومت آن است. فشار زیاد نیز زدودن ماسه مازاد از سطح قطعه، کار را دشوارتر خواهد کرد و همچنین بر روی الگوی پاشش در پرینت سه بعدی تاثیر گذار خواهد بود.

همچنین در صورت اعمال نامناسب فشار و ناهمگن بودن فشار تاثیر مثبت تبدیل به تاثیر منفی خواهد بود و باید در اعمال فشار دقت کرد. در مواردی که نیاز به اصلاح الگو پاشش است بهتر است به جای کاستن از مقدار فشار، بر روی نسبت آب به سیمان و کاهش دبی نازل و یا افزایش سرعت حرکت کلگی تمرکز کرد.

2. دانه بندی باید متناسب با ابعاد قطعه کار انتخاب شود. البته مواردی مانند کیفیت سطح نیز بایستی در انتخاب دانه بندی در نظر گرفته شود.

3. فاصله بین نازل تا سطح بستر پودر بایستی تا حد ممکن کم در نظر گرفته شود. هرچه فاصله بیشتر باشد تاثیر منفی بر روی الگو ترشدگی و کیفیت قطعه کار خواهد گذاشت.

4. کیورینگ بعد از پرینت قطعه حتما بایستی انجام شود. در صورت عدم کیورینگ بعد از پرینت، به مرور زمان قطعه دچار ریزش می گردد. بلافاصله بعد از پرینت نیز بهتر است که بر روی بستر پودر روکش پلاستیکی قرار داده شود تا از تبخیر زود هنگام آب موجود در بستر جلوگیری کند.

5. استفاده از زودگیر کننده به دلیل افزودن به هزینه و عدم تاثیر در روند کلی فرآیند توصیه نمی شود.

6. نسبت آب به سیمان تا حد ممکن بهتر است کم در نظر گرفته شود. هرچه نسبت آب به سیمان بیشتر در نظر گرفته شود کنترل فرآیند مشکل تر خواهد شد.

**ارائه شده در سومین کنگره توسعه زیرساختهای فناوری مهندسی عمران، معماری و شهرسازی ایران.**

Technology Infrastructure Development Civil Engineering, Architecture and Urban  
Development of Iran With the approach of the road and construction industry.



Fabrication of concrete 3D printer & Investigate print effective parameters  
Mahmoud Farzin – Professor of Mechanical engineering faculty, Isfahan university of  
technology  
Davood [Mostofinejad](#) – Professor of Civil engineering faculty, Isfahan university of  
technology

## ABSTRACT

*Although concrete is a common material in the building industry, automation in the construction of concrete structures is low. Additive manufacturing techniques can solve this problem. This study investigate the advantages of using a three-dimensional concrete printer for constructing structures and describing a three-dimensional printer for concrete, which prints concrete using additive manufacturing techniques and particle bed technology. This printer has the ability to print a variety of complex structures at the lowest cost and speed. In this paper, after describing the device, effective parameters will be investigated.*

**Keywords: 3d printing, additive manufacturing, concrete printer, particle bed printer, 3d printer**

## Bibliography

- Schutter, Geert de; Lesage, Karel; Mechtcherine, Viktor; Nerella, Venkatesh Naidu; Habert, Guillaume; Agusti-Juan, Isolda, .1  
"Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials", Cement and Concrete Research, 112,  
25–36, 2018.
- Buswell, R. A.; Leal de Silva, W. R.; Jones, S. Z.; Dirrenberger, J., "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research", .2  
Cement and Concrete Research, vol. 112, 37–49, 2018.
- Lowke, Dirk; Dini, Enrico; Perrot, Arnaud; Weger, Daniel; Gehlen, Christoph; Dillenburger, Benjamin, "Particle-bed 3D printing in .3  
concrete construction – Possibilities and challenges", Cement and Concrete Research, vol. 112, 50–65, 2018.
- Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T., "Mix design and fresh properties for high-performance .4  
printing concrete", Materials and Structures, 45, No. 8, 1221–1232, 2012.
- Lim, S.; Buswell, R. A.; Le, T. T.; Austin, S. A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T., "Developments in construction-scale additive .5  
manufacturing processes", Automation in Construction, 21, 262–268, 2012.
- Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Law, R.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T., "Hardened properties of high-performance .6  
printing concrete", Cement and Concrete Research, 42, No. 3, 558–566, 2012.
- facebook.com/3Dnatives, "Startup of the Month: 3D MicroPrint", 3dnatives.com/en/3d-microprint-interview-150120184/, .7  
access date: 3/5/2019.
- Schwartz, Joseph, "Graphic statics and their potential for digital design and fabrication with concrete", Cement and Concrete .8  
Research, vol. 112, 122–135, 2018 .
- Agustí-Juan, Isolda; Habert, Guillaume, "Environmental design guidelines for digital fabrication", Journal of Cleaner Production, .9  
142, 2780–2791, 2017.
- Malhotra, V. M., "Making concrete" greener" with fly ash", Concrete international, vol. 21, No. 5, 61–66, 1999. .10
- Pegna, Joseph, "Application of cementitious bulk materials to site processed solid freeform construction", 1995. .11
- Dini, , "D-shape", d-shape.com, access date: accessed 20 September 2017. .12

Gibbons, Gregory John; Williams, Reuben; Purnell, Phil; Farahi, Elham, "3D Printing of cement composites", <i>Advances in Applied Ceramics</i> , 109, No. 5, 287–290, 2010.	.13
Hansmeyer, B. Dillenburger, "Digital Grotesque", <i>digital-grotesque.com</i> , access date: accessed 6 October 2017.	.14
Voxeljet, "Voxeljet Industrial 3D Printing Systems", <a href="http://voxeljet.com">voxeljet.com</a> access date: accessed 31 October 2017.	.15
Dillenburger, Benjamin, "Maschinelle bersetzungen", <i>Tec21</i> , vol. 2016, No. 23, 24–27, 2016.	.16
Fromm, Asko, "Method and device for producing a concrete component, and concrete component produced according to the method", 2017.	.17
R. Rael, V. San Fratello, "RAEL SAN FRATELLO", <a href="https://www.rael-sanfratello.com/">https://www.rael-sanfratello.com/</a> access date: accessed 20 September 2017.	.18
Lowke, ; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C., "3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen Erste Ergebnisse zu beton-technologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen", Tagungsbericht . Internationale Baustofftagung, Weimar Google Scholar, 2015.	.19
Weger, D. Lowke, C. Gehlen, "3D printing of concrete structures with calcium silicate based cements using the selective binding method – effects of concrete technology on penetration depth of cement paste", 2016.	.20
Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, Ch; Talke, D.; Henke, K., "Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion effect of layer orientation on strength and durability",	.21
Shakor, Pshtiwan; Sanjayan, Jay; Nazari, Ali; Nejadi, Shami, "Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing", <i>Construction and Building Materials</i> , vol. 138, 398–409, 2017.	.22