

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

ساخت دستگاه پرینتر بتن سه بعدی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

سعید قهرمانی

اساتید راهنما

دکتر محمود فرزین

دکتر علیرضا فدائی

استاد مشاور

دکتر داود مستوفی نژاد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک - گرایش طراحی کاربردی سعید قهرمانی
تحت عنوان

ساخت دستگاه پرینتر بتن سه بعدی

در تاریخ ۹۸/۴/۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر محمود فرزین	۱- استاد راهنمای پایان نامه
دکتر علیرضا فدائی تهرانی	۲- استاد راهنمای پایان نامه
دکتر داود مستوفی نژاد	۳- استاد مشاور پایان نامه
دکتر مهدی کاروان	۴- استاد داور
دکتر محمدرضا فروزان	۵- استاد داور
دکتر رضا بیگنی	سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

پاسکزاری

پاس ورتایش خاص خداوندیست که جهان را به نظم خلق کرد، جهانی بنانده بر علم؛ خداوندی که میداند و میدانند...

مکرم فزوان تقدیم دکتر محمود فرزین و دکتر علیرضا فدایی که به عنوان استاد راهنما و دکتر داود مستوفی نژاد به عنوان استاد مشاور که محارنده را بهواره مورد لطف و محبت خود قرار

داده اند.

پاس از خانواده عزیز، و دوستانی محترم که دیشبر دین پروژه بنده را بهمراستی نموده و از هیچ کجی دریغ نکردند.

کلیه حقوق مالکیت مادی و معنوی مربوط به این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان و پدیدآورندگان است. این حقوق توسط دانشگاه صنعتی اصفهان و بر اساس خط مشی مالکیت فکری این دانشگاه، ارزش گذاری و سهم بندی خواهد شد.

هر گونه بهره برداری از محتوا، نتایج یا اقدام برای تجاری سازی دستاوردهای این پایان نامه تنها با مجوز کتبی دانشگاه صنعتی اصفهان امکان پذیر است.

تقدیم بہ آمان کہ وجودم جزئیہ وجودشان نیست

پروما در عزیزم

و تقدیم بہ عزیزترین کسان، کہ خودمیدانند عزیزند...

WWW.BESTENGINEERS.IR

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۲۰۰	۱-۱- تکنولوژی پرینتر سه بعدی و انواع روش های آن
۳	۱-۱-۱- پرینت به روش بسترپودر
۵	۲-۱- کاربردها، مزایا و معایب
۸	۲- فصل دوم
۸	۱-۲- پیشینه پژوهش در زمینه پرینت سه بعدی به روش بسترپودر
۱۸	۲-۲- مختصری در مورد بتن و افزودنی ها
۱۸	۱-۲-۲- شیمی سیمان
۱۹	۲-۲-۲- ترکیبات (فازهای) شیمیایی اصلی سیمان پرتلند
۲۶	۳-۲-۲- میزان آب در خمیر سیمان
۲۷	۴-۲-۲- بررسی دانه ها
۲۹	۵-۲-۲- دانه بندی
۳۰	۶-۲-۲- افت (انقباض)
۳۲	۷-۲-۲- روش های مراقبت
۳۴	۳- فصل سوم
۳۴	۱-۳- ساخت دستگاه
۳۵	۱-۳-۱- اسکلت
۳۵	۲-۳-۱- مخزن
۳۸	۳-۳-۱- کلگی دستگاه
۳۸	۴-۳-۱- پمپ
۳۹	۵-۳-۱- نازل

۳۹	۱-۳-۶- برد کنترل
۴۱	۳-۲- ارتقاء پرینتر دو بعدی به سه بعدی
۴۱	۲-۳-۱- دستگاه مورد استفاده
۴۲	۲-۳-۲- مسطح سازی سطح
۴۳	۲-۳-۳- جی کد نویسی
۴۴	۳-۳- بررسی نسبت آب به سیمان
۴۴	۳-۳-۱- محاسبه دبی لازم
۴۵	۳-۳-۲- محاسبه حجم سیمان لازم
۴۵...	۳-۴- دانه بندی
۵۳	۳-۵- روش انجام
۵۳	۵-۳-۱- جتینگ چسب
۵۳	۵-۳-۲- روش فعال سازی انتخابی چسب
۵۳	۵-۳-۳- روش نفوذ انتخابی چسب
۵۴	۳-۶- نازل
۵۶	۳-۷- مواد تشکیل دهنده بستر
۵۷...	۴- فصل چهارم
۵۷	۴-۱- نسبت آب به سیمان
۶۱	۴-۲- فشردگی بستر
۶۴	۴-۳- استفاده از ساپورت
۶۵	۴-۴- اندازه ذرات استفاده شده
۶۹	۴-۵- بررسی تأثیر سرعت بر الگو پاشش
۷۰	۴-۶- استفاده از سیمان خالص به عنوان بستر
۷۵	۴-۷- فاصله بین نازل و بستر
۷۵..	۴-۸- کیورینگ
۷۷	۴-۹- استفاده از زودگیر کننده

۷۷	۴-۱۰- قطعات پرینت شده دوبعدی
۸۲	۴-۱۱- قطعات پرینت شده سه بعدی
۸۴	۵- فصل پنجم
۸۴ .	۵-۱- نتیجه گیری
۸۵ ..	۵-۲- پیشنهادات
۸۶	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- مراحل مختلف پرینت به روش بستر ذرات [۹] // ۳
- شکل ۲-۱- روش های مختلف پرینت سه بعدی به روش بستر ذرات [۴] // ۴
- شکل ۳-۱- آجر پرینت شده به روش بستر ذرات برای استفاده در طرح اعجوبه دیجیتال [۱۴] // ۶
- شکل ۴-۱- تخت سنگ بهینه سازی شده و ساخته شده با استفاده از پرینتر سه بعدی به روش بستر ذرات [۱۵] // ۷
- شکل ۱-۲- نمایی شماتیک از مراحل روش ارائه شده توسط پگنا [۱۸] // ۹
- شکل ۳-۲- ربات صنعتی برای استفاده در روش چسباندن انتخابی ذرات [۲۳] // ۱۰
- شکل ۲-۲- سازه پرینت شده با روش D-Shape [۱۹] // ۱۱
- شکل ۴-۲- نمایی از سازه اعجوبه دیجیتال [۱۴] // ۱۲
- شکل ۵-۲- جسم پرینت شده به صورت پارامتریک که با روش های معمول امکان ایجاد آن وجود ندارد [۲۶] // ۱۴
- شکل ۶-۲- پروژه "شکوفه" [۲۷] // ۱۵
- شکل ۷-۲- نمونه برای تعیین دقت شکل (چپ) و مقاومت (راست) [۳۱] // ۱۶
- شکل ۸-۲- محورهای مشخص شده برای تست فشار تکمحوره محور x در جهت حرکت نازل و محور z در جهت عمق لایه ها [۳۱] // ۱۷
- شکل ۹-۲- لامپ مرجانی شکل [۳۲] // ۱۷
- شکل ۱۰-۲- محدوده مجاز شن و ماسه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM [۳۵] ... // ۳۰
- شکل ۱-۳- قسمتهای مختلف پرینتر // ۳۵
- شکل ۲-۳- ابعاد اسکلت دستگاه // ۳۶
- شکل ۳-۳- نمایی از مخزن و سطح متحرک // ۳۷
- شکل ۴-۳- نمای برشخورده مخزن و سطح متحرک // ۳۷
- شکل ۵-۳- نمایی از هد دستگاه به همراه جزئیات // ۳۸
- شکل ۶-۳- نمایی از پمپ استفاده شده به منظور تنظیم دبی // ۳۹
- شکل ۷-۳- نمایی از قسمت کنترل دستگاه // ۴۰
- شکل ۸-۳- نمایی از سیانسی سه محوره اصلاح شده // ۴۱

- شکل ۳-۹- نمایی نزدیک از قسمت کلگی /// ۴۲
- شکل ۳-۱۰- نحوه امتداد حد بالا منحنی دانه بندی استاندارد /// ۴۶
- شکل ۳-۱۱- نمایی شماتیک از نحوه اصلاح منحنی دانه بندی استاندارد /// ۴۸
- شکل ۳-۱۲- نمودار دانه بندی اصلاح شده برای بتن با حداکثر اندازه دانه ۱۱۸۰ /// ۵۱
- شکل ۳-۱۳- نمودار دانه بندی اصلاح شده برای بتن با حداکثر اندازه دانه ۶۰۰ /// ۵۱
- شکل ۳-۱۴- نمودار دانه بندی اصلاح شده برای بتن با حداکثر اندازه دانه ۳۰۰ /// ۵۲
- شکل ۳-۱۵- نمودار دانه بندی اصلاح شده برای بتن با حداکثر اندازه دانه ۱۵۰ /// ۵۲
- شکل ۳-۱۶- نازل‌های استفاده شده به منظور انجام آزمایشها /// ۵۴
- شکل ۴-۱- نمودار بررسی عرض و عمق تر شده /// ۵۹
- شکل ۴-۲- نمودار بررسی حجم تر شده /// ۵۹
- شکل ۴-۳- نمودار تاثیر فشار بر میزان نفوذ و حجم تر شده /// ۶۳
- شکل ۴-۴- نگهدارنده‌های کناری قطعه /// ۶۵
- شکل ۴-۵- تصویری از ساپورت‌های تهیه شده برای کف /// ۶۵
- شکل ۴-۶- نمایی شماتیک از قرارگیری ذرات در ضخامت دیوار /// ۶۶
- شکل ۴-۷- الگو تر شدگی بسترهای پودر با حداکثر اندازه دانه و دبی متفاوت /// ۶۷
- شکل ۴-۸- بررسی تاثیر میزان سرعت بر الگو ترشدگی /// ۷۱
- شکل ۴-۹- تشکیل قطرات بزرگتر و خالی شدن قسمتی از حجم سیمان در خط پاشش آب /// ۷۲
- شکل ۴-۱۰- نمایی فیلتر شده از نحوه پاشش آب بر روی بستر سیمان خالص و ترکیب ماسه و سیمان /// ۷۳
- شکل ۴-۱۱- تاثیر نسبت حجمی ماسه به بتن بر روی الگو پاشش /// ۷۴
- شکل ۴-۱۲- اختشاش ایجاد شده در هنگام پاشش نازل /// ۷۶
- شکل ۴-۱۳- تاثیر فاصله بین نازل و بستر بر الگو ترشدگی /// ۷۶
- شکل ۴-۱۴- قطعه پرینت شده شماره ۱ /// ۷۸
- شکل ۴-۱۵- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۲ /// ۷۸
- شکل ۴-۱۶- قطعه پرینت شده شماره ۳ /// ۷۹
- شکل ۴-۱۷- قطعه پرینت شده شماره ۴ /// ۸۰

شکل ۴-۱۸- نمای از قطعه پرینت شده شماره ۵ /// ۸۱ ...

شکل ۴-۱۹- نمای روبرو قطعه پرینت شده شماره ۵ /// ۸۱

شکل ۴-۲۰- نما از کنار قایق پرینت شده /// ۸۲

شکل ۴-۲۱- نما از بالا قایق پرینت شده /// ۸۲

شکل ۴-۲۲- نمای پرسپکتیو قایق پرینت شده /// ۸۳

فهرست جداول

جدول ۱-۲- ترکیبات شیمیایی اصلی سیمان و خصوصیات [۳۴]	۱۹
جدول ۲-۲- انواع سیمان و کاربردها [۳۴]	۲۰
جدول ۱-۳- اندازه الک و درصد رد شده قبل و بعد از اصلاح منحنی دانه‌بندی استاندارد	۴۶
جدول ۲-۳- مقادیر اصلاح شده سائز الک برای انواع دانه‌بندی	۴۹
جدول ۳-۳- مقادیر منحنی‌های دانه‌بندی اصلاح شده بر اساس سائز الک‌های استاندارد	۵۰
جدول ۱-۴- خلاصه‌ای از نتایج آزمون تأثیر دبی در میزان نفوذ	۵۸
جدول ۲-۴- نتایج آزمون تأثیر دبی در میزان نفوذ	۶۰ ...
جدول ۳-۴- خلاصه‌ای از نتایج آزمون بررسی تأثیر فشار بر میزان نفوذ	۶۱
جدول ۴-۴- جزئیات آزمایش‌های تأثیر فشار بر میزان نفوذ	۶۲
جدول ۵-۴- تأثیر دانه‌بندی در میزان نفوذ و الگو ترشدگی بستر پودر	۶۸
جدول ۶-۴- بررسی تأثیر نسبت حجمی ماسه به بتن بر مقادیر ترشدگی متوسط	۷۳
جدول ۷-۴- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۱	۷۷ .
جدول ۸-۴- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۲	۷۸ .
جدول ۹-۴- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۳	۷۹ .
جدول ۱۰-۴- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۴	۷۹
جدول ۱۱-۴- مشخصات قطعه پرینت شده شماره ۵	۸۰

فهرست علائم و نشانه ها

سرعت حرکت کلگی و نازل	V_{head}, V	حجم آب	V_w
نسبت آب به سیمان	n	دبی آب خروجی از نازل	Q
چگالی نسبی سیمان به آب	$\rho_{c/w}$	زمان انتقال آب	t
چگالی آب	ρ_w	عمق ترشده	h
چگالی سیمان	ρ_c	عرض تر شده	L
جرم آب	m_w	حجم کل سیمان موجود در بتن	V_{cT}
جرم سیمان	m_c	حجم کل بتن	$V_{concrete}$
نسبت حجمی هوا به بتن	$V_{A/con}$	حجم سیمان تر شده	V_c
		نسبت حجمی ماسه به بتن	$V_{s/con}$

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از پرینتر سه‌بعدی به دلیل نیاز به ساختارهایی با اشکال پیچیده‌تر، با هزینه کمتر و سرعت بیشتر، افزایش پیدا کرده است. استفاده از پرینتر سه‌بعدی در صنعت بتن می‌تواند باعث صرفه‌جویی در میزان بتن استفاده‌شده و تسریع در ساخت نسبت به روش‌هایی مانند قالب‌گیری می‌شود و همچنین امکان ساخت قطعات پیچیده که با قالب‌گیری امکان ساخت آن‌ها وجود ندارد، با این روش به وجود می‌آید. یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که از آن به‌منظور پرینت سه‌بعدی بتن می‌توان بهره جست، پرینت به روش بسترپودر است.

در قسمت ابتدایی این پژوهش به منظور دستیابی به فرمول‌بندی پارامترهای تاثیرگذار بر روی روند پرینت سه‌بعدی قطعات بتنی، به بررسی نظری پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار بتن و اصلاح پارامترها و روابط از جمله نمودار دانه‌بندی و درصد مواد موجود در بتن مانند درصد سیمان و درصد ماسه، پرداخته شده است. در ادامه با هدف بررسی پارامترهای موثر بر الگو ترشدگی بستر پودر، مانند نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به بتن، فاصله نازل از بستر، سرعت حرکت کلگی، دانه‌بندی و فشردگی بستر، آزمایش‌هایی طراحی و انجام شده و نتایج آن گزارش شده است. سپس دستگاه‌های پرینتر دو بعدی و سه بعدی به منظور پرینت المان‌های بتنی دو بعدی و سه بعدی طراحی و ساخته شد. جی‌کدهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزار Cura استخراج شده و به منظور هماهنگ کردن آن با روند پرینت اصلاحاتی بر روی جی‌کد انجام شده است. در انتها قطعه‌ای سه بعدی از جنس بتن، با استفاده از دستگاه پرینتر سه‌بعدی، پرینت شده است.

کلمات کلیدی: پرینتر سه بعدی بتن، روش بستر ذرات، الگو ترشدگی

فصل اول

مقدمه

برای ساخت سازه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که در هر کدام از این روش‌ها از ماده خاصی برای ساخت سازه استفاده می‌شود. یکی از روش‌های متداول که در آن از بتن استفاده می‌شود، قالب‌گیری بتن در حالت نیمه‌سیال در قالب است. در این روش شکل نهایی حجم بتنی به‌دست آمده، هم‌شکل هندسه قالب است. با استفاده از این روش رسیدن به اشکالی با سطوح محدب یا مقعر به دلیل سختی ساخت قالب و همچنین مقاومت کم بتن در برابر تنش‌های خمشی که نیاز به خم‌کاری آرماتور برای رسیدن به شکل موردنظر را ایجاب می‌کند، مشکل است. از دیگر مشکلات این روش، نیاز به زمان برای سخت شدن بتن و همچنین هزینه ماده به‌کاربرده شده در ساخت قالب است؛ بنابراین نیاز به روشی سریع، کم‌هزینه و خودکار، احساس می‌شود [۱].

با وجود اینکه بتن یک ماده متداول در صنعت ساختمان است، خودکارسازی در ساخت سازه‌های بتنی کم است. روش‌های ساخت‌افزودنی این مشکل را می‌تواند حل کند [۲، ۳]. روش ساخت‌افزودنی، ساخت تمام اتوماتیک قطعات، همراه با سفارشی‌سازی و ساخت اجزاء پیچیده و بدون هزینه زیاد را نوید می‌دهد. در مقایسه با روش‌های معمول، روش ساخت‌افزودنی

دارای قابلیت تولید ساختارهایی با پیچیدگی هندسی زیاد در تعداد کم، است. تکنولوژی پرینت سه بعدی فرمی از فرآیند ساخت-افزودنی^۱ است که در آن قطعه از روی هم قرار دادن لایه‌های متوالی افقی بر روی هم ساخته می‌شود. در میان روش‌های ساخت افزودنی، پرینت سه بعدی 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 قابل تولید است؛ بنابراین این روش می‌تواند دوراهی انتخاب بین بهینه‌سازی هندسی سازه و افزایش هزینه تولید را حل نماید [۴].

۱-۱- تکنولوژی پرینتر سه بعدی و انواع روش‌های آن

تکنولوژی پرینت سه بعدی فرمی از فرآیند ساخت افزودنی است که در آن قطعه از روی هم قرار دادن لایه‌های متوالی افقی بر روی هم ساخته می‌شود [۵].

بر اساس تحقیقات انجام شده دو پارامتر مهم که پروسه پرینت سه بعدی را کنترل می‌کند عبارت است از ماشین پرینتر و ماده پرینت شونده که مشخص می‌کند پرینتر سه بعدی چه نوع قطعه‌ای را می‌تواند تولید کند [۶]. برای اهداف سازه‌ای مختلف دو گروه اصلی از پرینتر وجود دارد که همه روش‌های پرینت زیرمجموعه این دو گروه قرار می‌گیرند: روش کانتورکرفتینگ^۲ و روش بسترپودر^۳ [۷، ۸].

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

روش کانتورکرفتینگ، سرعت پرینت و بهره‌وری را هدف قرار داده است. از این رو جزء پرینترها با رزولوشن پایین است. این روش متداول‌ترین روش مورداستفاده است و به صورت ویژه به توسعه تولید انبوه کمک می‌کند [۷]. به دلیل سرعت بالا پرینت، در مقاومت ماده و شکل سازه محدودیت‌های خاصی وجود دارد. نوعی از روش کانتورکرفتینگ موسوم به "کانکجت"^۴ 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 [۸].

¹ Additive manufacturing

³ Particle-bed

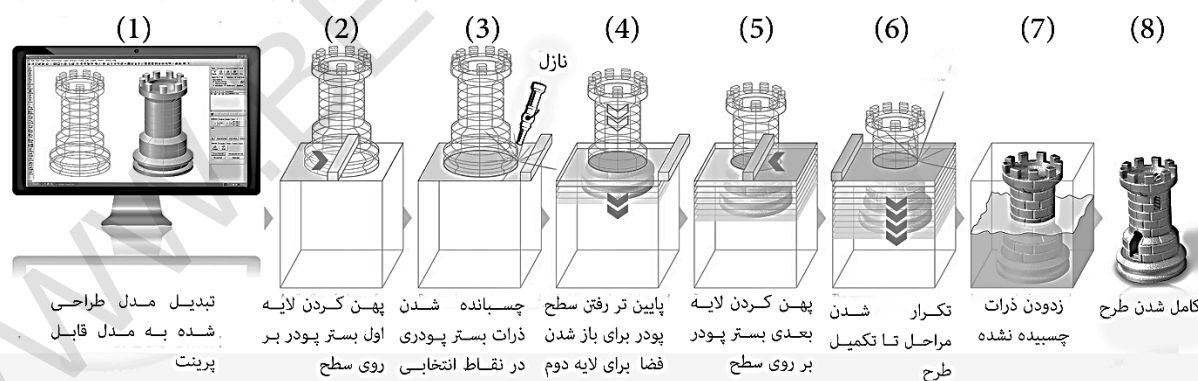
² Contour Crafting

⁴ Concjct

روش بسترپودر پیچیدگی المان 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 می‌کنند؛ به همین دلیل با استفاده از این روش می‌توان قطعاتی با رزولوشن بالا و پیچیدگی زیاد را تولید کرد.

۱-۱-۱- پرینت به روش بسترپودر

این روش بر اساس ایجاد لایه مسطح خشک و تغییر در نقاط دلخواه است. در شکل ۱-۱ مراحل روش پرینت به روش بسترپودر قابل مشاهده است. در مرحله (۱) بایستی مدل طراحی شده با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی به مدلی قابل پرینت، تبدیل شود. نرم‌افزار با توجه به داده‌هایی 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 (۲) دستگاه لایه‌ای از شن با ضخامت مشخص بر روی بستر پهن می‌کند. در مرحله (۳) نازل ماده چسب را بر روی قسمت‌هایی که بایستی به هم چسبانده شوند می‌ریزد تا لایه مورد نظر الگو مربوط به خود را دریابد. در مرحله ۴ کفی بستر پودر پایین‌تر می‌آید تا فضا برای پهن شدن سطح جدیدی از مواد بستر فراهم آید. 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 ۱-۱- مراحل مختلف پرینت به روش بستر ذرات [۹]



شکل ۲-۶- پروژه "شکوفه" [۲۷]

اولین پژوهشی که بر روی تکنولوژی ماده برای روش چسباندن انتخابی تمرکز کرد، توسط لوک^۱ [۲۸] در ۲۰۱۵ صورت گرفت. ایشان به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان (W/C^2) بر روی مقاومت المان‌های تولیدشده با روش فعال‌سازی انتخابی سیمان پرداختند. در این روش المان‌های سیمانی، با به کار بردن محلول آبی بر روی ترکیب دانه‌های ریز سیمان (دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر) تولید می‌شدند. ضخامت لایه بین ۱ تا ۳ 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^۳ 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^۴ [۲۹] روش دیگر چسباندن انتخابی با عنوان نفوذ انتخابی خمیر^۵ در ۲۰۱۶ شرح داد. این روش از سیال خمیر سیمان و لایه‌ای از ذرات (قطر میانگین کمتر و یا مساوی ۳ میلی‌متر) برای تولید المان‌های بتنی استفاده کرد. ضخامت لایه پرینت سه میلی‌متر بود. مقاومت فشاری نمونه آزمایش استوانه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۱ میلی‌متر در نسبت آب به سیمان معادل

^۱ Lowke

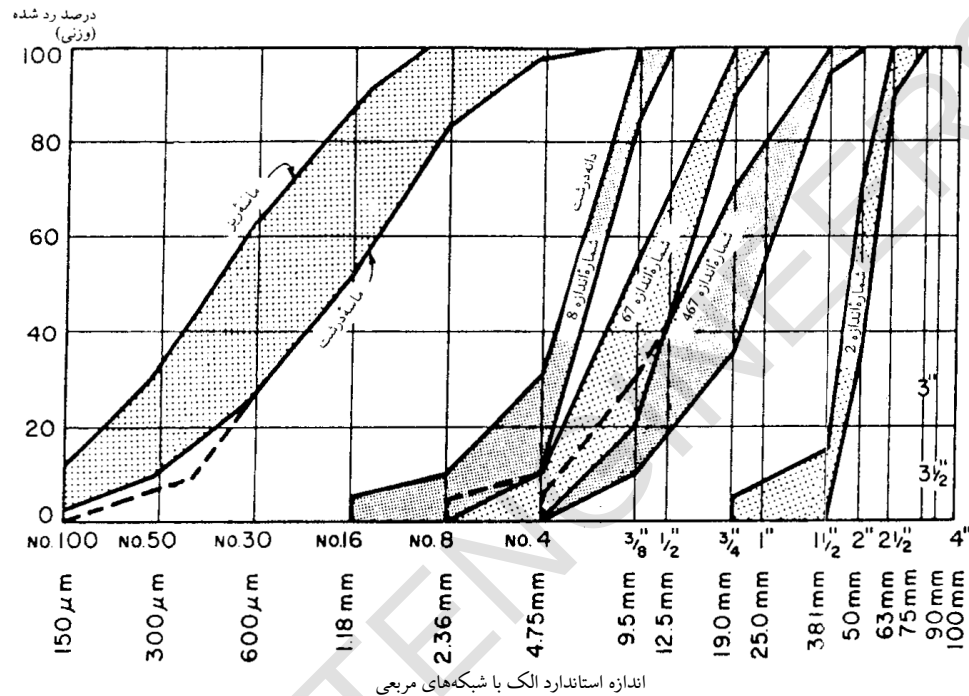
^۲ Water/Cement

^۳ Hydration

^۴ Weger

^۵ Selective paste intrusion

در شکل ۱۰-۲ منحنی دانه‌بندی استاندارد برای بتن بر اساس استاندارد ASTM قابل مشاهده است. این منحنی، بر اساس دانه‌بندی پیوسته تنظیم شده است یعنی بتنی که بر اساس این منحنی تنظیم شود اولاً تمام ابعاد استاندارد دانه‌ها در آن موجود است؛ ثانیاً مقدار بعضی از ابعاد نسبت به مقدار سایر ابعاد به صورت چشم‌گیری بیشتر یا کمتر نیست.



شکل ۱۰-۲ - محدوده مجاز شن و ماسه مصرفی بر اساس استاندارد ASTM [۳۵]

۲-۲-۶- افت (انقباض) [۳۵]

افت بتن پدیده‌ای است که از زمان گیرش بتن آغاز و در طول زمان سخت شدن، ادامه می‌یابد (به این پدیده گاهی آب‌رفتگی نیز گفته می‌شود).

افت بتن در حقیقت یک نوع کاهش حجم است که در طول زمان اتفاق می‌افتد. وقوع پدیده افت در اثر آب اضافی بکار رفته در ساخت بتن است. قبلاً ذکر شد که آب موردنیاز جهت انجام واکنش‌ها شیمیایی سیمان ۲۵ درصد وزنی سیمان است؛ یعنی اگر نسبت آب به سیمان را ۲۵ درصد در نظر گیریم، تمام این آب صرف واکنش‌های شیمیایی می‌شود. ولی به دلیل حصول کارایی مطلوب، $\frac{W}{C}$ را بین ۰/۴ تا ۰/۶ در نظر می‌گیرند که آب مازاد بر $\frac{W}{C}=0/25$ در بتن باقی می‌ماند. در روزهای اول عمر بتن قسمتی از آب اضافی بر اساس خاصیت موئینگی به سمت سطح بتن بالا آمده و تبخیر می‌شود، بدین ترتیب، جای آن خالی می‌ماند. به همین لحاظ، بتن تمایل پیدا می‌کند که خودش را جمع کرده و حجم ازدست‌رفته را پر کند (از نظر تقریب به

با استفاده از رابطه ۷ می‌توان دبی موردنیاز برای نازل را بر اساس پارامترهای بتن و سرعت حرکت نازل و همچنین مشخصات قطعه نهایی به دست آورد.

۳-۳-۲- محاسبه حجم سیمان لازم

برای ساخت بتن بایستی نسبت‌های حجمی و جرمی مدنظر قرار گیرند تا بتنی مرغوب حاصل شود. در این قسمت به بیان نحوه به دست آوردن مقدار سیمان موردنیاز برای ساخت بتن پرداخته می‌شود.

با فرض اینکه حجم بتن لازم، V_{con} ، نسبت حجمی ماسه به بتن، $V_{s/con}$ ، نسبت آب به سیمان، n ، نسبت حجم هوا بتن به حجم بتن، $V_{A/con}$ ، در نظر گرفته شود و با توجه به رابطه ۵ که نسبت حجمی آب به سیمان را بیان می‌کرد، حجم بتن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

رابطه ۸ حجم ماسه+حجم هوا+حجم سیمان+حجم آب= حجم بتن

$$V_{con} = V_{s/con}V_{con} + V_{A/con}V_{con} + V_{CT} + \rho_{c/w} \times n \times V_c \quad \text{رابطه ۹}$$

با استفاده از رابطه بالا و استخراج V_c ، حجم سیمان موردنیاز به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$V_{CT} = \frac{V_{con}(1 - V_{s/con} - V_{A/con})}{1 + n \times \rho_{c/w}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

۳-۴-۲- دانه‌بندی

همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد، دانه‌بندی بایستی پیوسته باشد. اگر ابعاد دانه‌بندی بر اساس منحنی دانه‌بندی استاندارد انتخاب شود می‌توان گفت که این پیوستگی در دانه‌بندی رعایت شده است. با توجه به اینکه در پروژه حاضر بتن مورد استفاده بتنی با دانه‌بندی ریز است، بایستی اصلاحاتی بر روی اندازه دانه‌ها منحنی دانه‌بندی استاندارد صورت گیرد تا علاوه بر قابل استفاده بودن برای پروژه حاضر، پیوستگی دانه‌ها حفظ شود. با توجه به ضخامت لایه‌های پهن شده بر روی بستر می‌توان سایز بزرگ‌ترین دانه موجود در بستر را تعیین کرد. به همین منظور منحنی دانه‌بندی استاندارد برای بتن‌هایی با حداکثر اندازه دانه ۱۱۸۰، ۶۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ اصلاح شده است.

همان‌طور که اشاره شد اصلاح منحنی دانه‌بندی باید به گونه‌ای باشد که پیوستگی بتن حفظ گردد. به همین منظور اصلاح منحنی دانه‌بندی با استفاده از منحنی دانه‌بندی بتن استاندارد و فشرده شدن آن صورت گرفته است. فشرده‌سازی به گونه‌ای اعمال شده است که حد بالا و پایین درصد رد شده از بزرگ‌ترین الک به صد در صد برسد.

جدول ۴-۲- نتایج آزمون تأثیر دبی در میزان نفوذ

۰/۶		۰/۵۵		۰/۵		۰/۴۵		۰/۴		۰/۳۵		۰/۳		دبی
عرض	عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	آزمایش
۴/۹	۳/۳۵	۴/۷۵	۳/۶۵	۴/۵	۳/۴	۳/۹۵	۳/۱۵	۴/۳	۲/۸	۳/۷۵	۲/۵	۳/۵۵	۲/۰۵	۱
۴/۷	۳/۹	۴/۵	۳/۷	۴/۲	۳/۵	۴/۵	۳/۲	۴/۲۵	۲/۸	۳/۶	۲/۳	۳/۵۵	۲/۰۵	۲
۴/۸	۳/۳۵	۴/۷	۳/۲۵	۴/۳۵	۳/۴	۳/۹	۳/۲۵	۳/۷	۲/۶	۴	۲/۳	۳/۶	۲/۰۵	۳
۴/۴۵	۳/۴	۴/۵۵	۳/۶	۴/۵	۳/۵	۴/۴	۳	۴/۳	۲/۵	۳/۶۵	۲/۳	۳/۳۵	۱/۹۵	۴
۴/۸	۳/۸	۴/۴	۳/۱	۴/۴	۳/۳۵	۴	۳/۲	۴/۱	۲/۶	۳/۶۵	۲/۱۵	۳/۵	۱/۹	۵
۴/۷۵	۳/۴	۴/۴	۳/۷	۴	۳/۳	۴/۳	۳/۰۵	۳/۹۵	۲/۷۵	۴	۲/۴۵	۳/۳۵	۱/۹۵	۶
۴/۷۵	۳/۶	۴/۵	۳/۵۵	۴/۳	۳/۱۵	۴/۳	۳/۲۵	۳/۹	۲/۷۵	۳/۸	۲/۳	۳/۵	۲/۱	۷
۴/۸۵	۳/۶۵	۴/۷	۳/۷	۴/۴	۳	۴/۴	۳/۱۵	۳/۷	۲/۸	۳/۹	۲/۳۵	۳/۴	۱/۹	۸
۴/۶	۳/۷۵	۴/۴	۳/۷	۴/۵	۳/۰۵	۴/۳۵	۳/۰۵	۳/۸	۲/۶	۳/۸	۲/۱۵	۳/۳۵	۱/۹۵	۹
۴/۴	۳/۸	۴/۶	۳/۰۵	۴/۳۵	۳/۳۵	۴	۳/۲	۴	۲/۸	۳/۸۵	۲/۲	۳/۸۵	۲/۱	۱۰
۴/۷	۳/۶	۴/۵۵	۳/۵	۴/۳۵	۳/۳	۴/۲	۳/۱۵	۴	۲/۷	۳/۸	۲/۳	۳/۵	۲	میانگین

به منظور تعیین نسبت حجمی ماسه به بتن باید پارامترهای مختلف در نظر گرفته شود. اما به صورت مطلق بر اساس نتایج این آزمایش 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.

۴-۷- فاصله بین نازل و بستر

یکی از متغیرهایی که در الگو ترشدگی تأثیر دارد فاصله بین نازل تا سطح بستر پودر است. هنگام خروج آب از نازل در ابتدا جریان آب، آرام و بدون اغتشاش است و ذرات آب از یکدیگر جدا نشده‌اند. با فاصله گرفتن از نازل، اغتشاش مسیر آب بیشتر شده و ذرات آب از یکدیگر جدا می‌شوند. این جداشدگی با فاصله گرفتن از نازل بیشتر می‌شود. به همین دلیل بهتر است که فاصله بستر پودر و نازل تا حد ممکن کم باشد. اغتشاش ایجادشده در شکل ۴-۱۲ قابل مشاهده است. قسمت ب و ج این شکل از اعمال فیلتر سیاه‌وسفید و زوم بر روی شکل قسمت الف حاصل شده است. ناحیه A قسمت ج این شکل، بیانگر قسمت بدون اغتشاش و ناحیه B این قسمت بیانگر قسمت با اغتشاش است.

علاوه بر اغتشاش ایجادشده با فاصله گرفتن از نازل با توجه به اینکه جریان آب در جهت شتاب جاذبه زمین است سرعت آب بیشتر می‌شود و این امر نیز به‌خودی‌خود می‌تواند کیفیت قطعه را تحت تأثیر قرار دهد. آزمایش‌هایی با دو فاصله مختلف بر روی سه گروه از ذرات (درشت ریز و متوسط) انجام شد. در شکل ۴-۱۳ می‌توان نتایج این آزمایش‌ها را مشاهده کرد. در هر سه نوع ترکیب مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله عرض الگو ترشدگی کمتر شده است. در نظم الگو تغییر زیادی مشاهده نشد.

۴-۸- کیورینگ

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد کیورینگ لازمه ایجاد قطعه‌ای بتنی با استحکام مناسب است و به‌واسطه روش‌های مختلفی انجام می‌پذیرد. کیورینگ قطعات در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول کیورینگ، بلافاصله بعد از پرینت آغاز می‌شود. در این مرحله به‌منظور پیشگیری از بخار شدن آب موجود در قطعه بعد از پرینت و قبل از پاک‌سازی قطعه، پوشش نایلونی بر روی آن قرار داده می‌شود تا از تبخیر آب جلوگیری کند. تأثیر قرار دادن این پوشش بر روی مقاومت کاملاً قابل ملاحظه است؛ به‌طوری‌که قطعه با کیورینگ دارای چسبندگی مناسب‌تری نسبت به قطعه بدون کیورینگ بود. مرحله بعدی کیورینگ پس از پاک‌سازی ذرات اضافی از روی قطعه با پاشش آب صورت می‌گرفت. آب در این مرحله با استفاده از اسپری،



Isfahan University of Technology
Department of Mechanical Engineering

Fabrication of concrete 3D printing machine

A Thesis

Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science

By

Saeed Ghahremani

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on June, 23, 2019

1- M. Farzin, Prof. (Supervisor)

2- A.R. Fadaei, Assoc. Prof. (Supervisor)

3- D. Mostofinejad, Prof. (Advisor)

4- M.R. Forouzan, Prof. (Examiner)

5- M. Karevan, Assist. Prof. (Examiner)

Department Graduate Coordinator (R. Tikani)