

به نام خدا

# مبانی و اصول مهندسی اکسترودرها

مؤلف:

مهندس مجید حیاتی

انتشارات ارسطو

(چاپ و نشر ایران)

ویراست دوم - ۱۳۹۸

## فهرست مطالب

پیش گفتار : ۱۳

مقدمه : ۱۶

بخش ۱ : تعاریف و کلیات : ۲۲

عملیات اکسترودرها : ۳۹

پردازش پلاستیک : ۵۳

پروفایل گرمایش و سرمایش اکسترودر : ۵۷

تجهیزات کمکی : ۶۳

ایمنی کار با اکسترودرها : ۷۳

اتلاف انرژی در اکسترودر : ۷۶

پیش بینی راندمان تولید : ۷۹

عیب یابی : ۸۴

اکسترودرهای تک مارادونه : ۸۶

اکسترودرهای دو مارادونه : ۹۶

نصب و هم‌ترازی : ۱۰۲

سیستم نیروی محرکه : ۱۱۱

فرآیند شکل‌دهی : ۱۲۰

بخش ۲: اکسترودرهای تک مارادونه : ۱۲۹

فصل ۱ : تجهیزات اکسترودرها : ۱۳۰

۱-۱ نیرومحرکه : ۱۴۲

۱-۲ سیستم خوراک‌دهی : ۱۵۲

۱-۳ سیلندرها و گرم‌کن‌های حرارتی : ۱۵۸

۱-۴ مارادون‌ها : ۱۷۵

۱-۵ صفحه سرعت‌شکن، مجموعه صافی‌ها و تعویض‌کننده‌های

صافی : ۱۹۳

۱-۶ گیر پمپ‌ها (پمپ‌های چرخ‌دنده‌ای) : ۲۱۰

۱-۷ دای‌ها : ۲۳۵

۱-۷-۱ ملاحظات عمومی : ۲۳۷

۱-۷-۲ تعادل در دای با تنظیم طول لبه ها : ۲۴۱

۱-۷-۲ تعادل جریان با استفاده از تنظیم ارتفاع کانال : ۲۵۴

۱-۷-۳ روش های دیگر تعادل در دای : ۲۶۲

۱-۷-۴ دای های فیلم صفحه : ۲۶۴

۱-۷-۵ تنظیم جریان در دای های فیلم و صفحه : ۲۷۳

۱-۷-۶ دای نعل اسبی : ۲۷۸

۱-۷-۷ دای های لوله و تیوپ : ۲۸۳

۱-۷-۷-۱ تعیین نسبت کشش : ۲۹۴

۱-۷-۷-۲ طول لبه : ۳۰۰

۱-۷-۷-۳ زاویه مخروطی : ۳۰۲

۱-۷-۸ دای های فیلم دمشی : ۳۰۶

۱-۷-۸-۱ هندسه Mandrel حلزونی : ۳۱۶

۱-۷-۸-۲ اثر هندسه دای بر توزیع جریان : ۳۱۹

۱-۷-۹ دای‌های اکستروژن پروفیل : ۳۳۰

۱-۷-۱۰ دای و feed blocks ها در سیستم کو اکستروژنی :

۳۳۴

۱-۷-۱۰-۱ دای یک کاناله و feed block : ۳۳۷

۱-۷-۱۰-۲ دای‌های چند کاناله : ۳۴۲

۱-۷-۱۰-۳ ترکیب feed block و دای چند کاناله : ۳۴۹

۱-۷-۱۰-۴ انحراف سطح مشترک : ۳۵۴

۱-۷-۱۱ فرآیند گرانول سازی : ۳۶۱

۱-۷-۱۱-۱ روش رشته ای داخل آب : ۳۶۲

۱-۷-۱۱-۲ سیستم برش داخل آب : ۳۸۲

الف) روش شمارش گرانول‌ها : ۳۹۴

ب) روش محاسبه دور کاتر و ارتباط آن با گرفتگی در نازل‌های

صفحه دای : ۳۹۸

روش دیگر برای محاسبه میزان گرفتگی در نازل‌های دای : ۴۰۸

۱-۷-۱۱-۵ نقص در گرانول‌ها و تجهیزات گرانول سازی و راه

حل‌هایی برای رفع آنها : ۴۱۰

مزایای سیستم برش داخل آب عبارتند از : ۴۲۴

۱۲-۷-۱ سیستم گرانول ساز برش و پرتاب داخل آب : ۴۲۵

فصل ۲ : رفتار پلیمر در اکسترودر : ۴۳۰

۱-۲- ناحیه خوراک : ۴۳۳

۲-۲- ذوب یا نرم کردن پلیمر : ۴۷۴

۳-۲ ذوب و اختلاط : ۵۰۰

۴-۲: ناحیه سنجش (اندازه‌گیری) یا منطقه پمپاژ : ۵۱۲

۵-۲: محاسبه دبی اکسترودر : ۵۱۵

۱-۵-۲ مدل‌سازی جریان مذاب در ناحیه سنجش : ۵۱۸

۲-۵-۲ نتیجه‌گیری : ۵۴۷

۳-۵-۲ تغییرات فشار : ۵۵۱

۶-۲- اکسترودرهای دارای ناحیه فرارزدا : ۵۵۸

۷-۲- محاسبه توان مارادون : ۵۷۱

۱-۷-۲- نتیجه‌گیری : ۵۸۰

۸-۲- دمای مذاب : ۵۸۴

۹-۲- دای و محاسبات آن : ۵۸۸

۱-۹-۲ تعریف پدیده تورم پس از دای و راه‌های کاهش آن : ۵۹۷

۱- کاهش دبی : ۵۹۸

۲- افزایش طول دای : ۵۹۹

۳- افزایش دمای دای : ۶۰۰

۲-۹-۲ پدیده جمع شدگی : ۶۰۲

۳-۹-۲ پدیده چشم ماهی : ۶۰۶

۴-۹-۲ ناپایداری مذاب : ۶۰۸

۵-۹-۲ معادلات دبی و نرخ برش در دای : ۶۱۴

۶-۹-۲ نقطه عملکرد اکسترودر : ۶۲۰

فصل ۳ : اصول طراحی مارادون : ۶۲۸

۳- طراحی مارادون : ۶۲۸

۱-۳- مارادون مانع دار (Barrier screw) : ۶۴۵

۲-۳- ناحیه ذوب و اختلاط مارادون : ۶۵۳

۳-۳- فرسایش مارادون : ۶۶۹

۱-۳-۳ اندازه‌گیری خوردگی مارادون : ۶۸۶

فصل ۴ : تئوری عملیات و افزایش مقیاس : ۶۸۹

۱-۴ پروفایل دمایی اکسترودر : ۶۹۰

۲-۴- اکسترود کردن یا بالا آوردن تولید : ۷۰۵

۳-۴- شرایط یک عملیات پایدار : ۷۱۲

۴-۴- از سرویس خارج کردن و تعویض محصول : ۷۱۵

۵-۴- افزایش مقیاس : ۷۴۰

**بخش ۳ : اکسترودرهای دو مارادونه : ۷۵۵**

فصل ۵ : اکسترودرهای دو مارادونه : ۷۵۶

مقدمه : ۷۵۶

۱-۵: اکسترودرهای دو مارادونه ناهمسوگرد : ۸۳۲

مقایسه جریان و اختلاط در کانال‌های C شکل باز در اکسترودرهای

دو مارادونه همسو گرد و ناهمسوگرد : ۸۴۶

حذف مواد فرار در اکسترودرهای دو مارادونه ناهمسوگرد : ۸۶۳

اکسترودرهای دو مارادونه ناهمسوگرد، مماسی و درهم‌فرورفته



(CRN1) : ۸۶۷

۲-۵ اکسترودرهای دو مارادونه کاملاً درهم فرورفته همسو گرد :  
۸۸۱

تغذیه و انتقال ذرات مواد افزودنی در اکسترودرهای دو مارادونه  
همسو گرد. : ۸۸۶

ذوب در اکسترودرهای دو مارادونه همسو گرد : ۸۸۹

جریان و تولید فشار در اکسترودرهای دو مارادونه همسوگرد :  
۹۰۶

فصل ۶ : رفتار پلاستیک در اکسترودرهای دو مارادونه : ۹۱۹

۱-۶ ناحیه خوراک : ۹۲۱

۲-۶ نرم و ذوب کردن : ۹۳۵

۳-۶ انتقال مذاب : ۹۴۴

۴-۶ اختلاط : ۹۴۷

۵-۶ خوراک جانبی (جریان پایین دست) : ۹۵۹

۶-۶ بخار زدایی : ۹۷۱

۷-۶ پمپاژ : ۹۷۴

۸-۶ فشار مذاب : ۹۷۷

۹-۶ نرخ برش، اختلاف فشار و دیگر محاسبات اکسترودر : ۹۸۰

۹-۹-۱ ۶-۹ نرخ برش : ۹۸۱

۹-۹-۲ ۶-۹ محاسبات اکسترودر : ۹۹۲

فصل ۷ : اصول طراحی دو مارادونه ها : ۹۹۸

۷-۱ المان‌های حمل مذاب : ۱۰۰۲

۷-۲ المان‌های اختلاط : ۱۰۱۱

۷-۳ کاربردهای طراحی : ۱۰۲۴

۷-۴ جدا کردن المان‌های مارادون : ۱۰۳۶

فصل ۸ : شرایط فرآیندی و افزایش مفیاس : ۱۰۴۴

۸-۱ پروفایل دمایی اکسترودر : ۱۰۴۵

۸-۲ سرمایش و گرمایش اکسترودرها : ۱۰۵۸

۸-۲-۱ سرمایش : ۱۰۶۳

۸-۲-۲ گرمایش : ۱۰۷۹

۸-۳ سرعت مارادون : ۱۰۸۳

- ۴-۸- متغیرهای فرآیند و راه‌اندازی تولید : ۱۰۸۸
- ۵-۸- رابطه بین دما، فشار و میزان خروجی : ۱۰۹۶
- ۶-۸- راه‌اندازی و از سرویس خارج کردن فرایند : ۱۱۰۰
- ۷-۸- روش‌های پاک‌سازی و تمیز کردن مارادون، سیلندرها، دای و... و مواد پاک‌سازی کننده : ۱۱۰۳
- ۸-۸- توصیه‌های فرآیندی برای سیستم‌های مختلف رزین : ۱۱۲۱
- ۱-۸-۸- آکریلونیتریل بو تا دی ان استایرن : ۱۱۲۲
- ۲-۸-۸- پلی آمید : ۱۱۳۲
- ۳-۸-۸- پلی اتیلن : ۱۱۴۹
- ۴-۸-۸- پلی اتیلن متاکریلات (اکریلیک) : ۱۱۶۱
- ۵-۸-۸- پلی پروپیلن : ۱۱۶۵
- ۶-۸-۸- پلی کربنات : ۱۱۷۰
- ۷-۸-۸- پلی استایرن : ۱۱۷۶
- ۱-۸-۸-۷- شرایط اکستروژن : ۱۱۷۸
- ۸-۸-۸- پلی ونیل کلراید (PVC) : ۱۱۸۰

۱-۸-۸-۸- شرایط اکستروژن : ۱۱۸۳

۹-۸-۸- پلی استر : ۱۱۸۷

۱-۹-۸-۸- شرایط اکستروژن : ۱۱۹۳

۹-۸- افزایش مقیاس : ۱۱۹۵

## فصل ۹ : روش های شناخت و حل مشکلات اکستروژن : ۱۲۱۱

۱-۹: پنج گام برای حل مشکلات فرآیند : ۱۲۳۶

۲-۹: عیب یابی و رفع مشکلات اکستروژن : ۱۲۶۴

عیب یابی و رفع مشکلات مکانیکی : ۱۲۷۲

عیب یابی و رفع مشکلات فرآیندی : ۱۳۱۲

پیوست ها : ۱۳۷۴

مراجع و مآخذ : ۱۴۰۰



## پیش گفتار

خداوند بزرگ را شاکرم که این توفیق را نصیب من کرد تا این مجموعه را گردآوری و به رشته تحریر در آورم. این مجموعه حاصل سالها کار و تلاش با اکسترودرها در واحدهای پلیمری پتروشیمی است از اکسترودرهای ساخت دهه ۱۹۷۰ میلادی ساخت شرکت JSW ژاپن در کارخانه پلی اتیلن سنگین پتروشیمی بندرامام تا اکسترودرهایی در مقیاس مگا با ظرفیت بیش از ۳۰ الی ۴۰ تن در ساعت در شرکت پتروشیمی نویدزرشیمی ( محل کار اینجانب) و کارخانههای پلی اتیلن سنگین و پلی پروپیلن پتروشیمی مارون واقع در منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر.

اما مشوق من در تالیف این کتاب نبود یک مجموعه تقریباً مدون فارسی درباره اکسترودرها بوده اکسترودرهایی که در صنعت پلاستیک (در صنعت پتروشیمی و صنعت پایین دست) جزء یکی از تجهیزات اصلی و گران قیمت فرآیندی است. امیدوارم که این مجموعه بتواند کمبود دانش فنی اکسترودرها را در کشور اندکی بهبود بخشد. از فعالان جامعه دانشگاهی و صنعتی در خواست می‌کنم که برای رفع اشکالات احتمالی این مجموعه تلاش کنند نیک واقفم که کتاب حاضر خالی از اشکال نبوده لذا مشتاقانه آماده دریافت هرگونه انتقاد و نظر پیشرفت دهنده آن هستم.

در پایان این کتاب را تقدیم می‌کنم به مردم خوب و خون گرم زادگاهم شهرستان بندر هندیجان یکی از قطبهای عظیم صنعت صیادی کشور و همشهری‌های عزیزم در شهرستان ماهشهر قطب

عظیم صنعت پتروشیمی کشور.

در پایان از همه همکاران و دوستان عزیزی که مرا در این راه یاری دادند، بخصوص جناب آقای مهندس سعید قاسمی که در شناسایی اشکالات کتاب تلاش و کمک بزرگی به من نمودند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

تابستان ۱۳۹۵

مجید حیاتی

## مقدمه

به‌طور کلی هدف نگارش کتاب، تهیه مجموعه‌ای تقریباً مدون در حوزه فرآیندهای شکل‌دهی پلیمرها و به‌طور خاص شناخت، اصول و عملکرد اکسترودرها است؛ آنچه بیش از همه مرا به نگارش این مجموعه واداشت نبود یک کتاب مرجع درباره اکسترودرها به زبان فارسی است. گسترش روزافزون صنعت پلاستیک در جهان بویژه ایران و اهمیت اکسترودرها در این صنعت، ضرورت نگارش این مجموعه را توجیه می‌کند.



این کتاب در سه بخش به رشته تحریر درآمده است.

## بخش ۱ تعاریف و کلیات.

این بخش به نوعی خلاصه‌ای از دو بخش دیگر است یا به عبارت دیگر تعاریف و کلیاتی را بیان می‌کند که در بخش‌های بعدی به طور مفصل‌تری به آن‌ها پرداخته شده است. مطالعه آن پیش‌نیاز دو بخش دیگر است

بخش ۲ درباره شناخت و اصول عملکرد اکسترودرهای تک مارادونه بحث می‌کند و شامل ۴ فصل است .

## فصل ۱ شناخت تجهیزات اکسترودرها.

در این فصل درباره تجهیزات اکسترودرها به طور خلاصه توضیحاتی ارائه شده است و خواننده با

اصول و عملکرد این تجهیزات آشنا می‌شود.

فصل ۲ رفتار پلیمر در اکسترودر را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. همچنین درباره دبی، توان اکسترودر و عوامل مؤثر بر آن‌ها، انواع اختلاط و عوامل مؤثر بر آن، مکانیسم ذوب و تغییرات فشار و دمای ذوب بحث و کنکاش میکند.

فصل ۳ درباره اصول طراحی مارادونها است. توضیحاتی درباره انواع مارادونها برای فرایندهای خاص، انواع نواحی ذوب و اختلاط و مزیت‌ها برای این فرایندها در آن گنجانده شده است.

فصل ۴ تئوری عملیات و افزایش مقیاس

پروفایل دمایی برای انواع فرایندها، راه‌اندازی تولید، از سرویس خارج کردن و شرایط تعویض محصول در این فصل آورده شده است. اگر قصد ارتقا اکسترودر خود را به یک اکسترودر بزرگ‌تر

دارید بخش افزایش مقیاس به کار شما خواهد آمد.

بخش ۳ اصول و عملکرد اکسترودرهای دو مارادونه را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد و شامل فصل ۵ (فصل ۵ تا ۹) است.

در فصل ۵ ضمن تشریح اکسترودرهای دو مارادونه، اصول حاکم بر دو مارادونه‌ها و مقایسه بین انواع دو مارادونه‌ها با توجه به نوع کاربری آن‌ها تحلیل و در ادامه درباره اکسترودرهای دو مارادونه همسو گرد و ناهمسو گرد توضیحات مفصل‌تری بیان شده است.

فصل ۶ رفتار پلاستیک در اکسترودرهای دو مارادونه (پمپاژ، فشار مذاب، دمای مذاب، نرخ برش و...) را مورد بحث و بررسی قرار داده است.

فصل ۷ توضیحاتی درباره اصول طراحی دو مارادونه‌ها می‌دهد که شامل بخش‌هایی چون

انواع المان‌های حمل‌کننده و اختلاط‌کننده است و در پایان خلاصه‌ای از کاربردهای طراحی را بیان می‌کند.

فصل ۸ شرایط فرایندی و افزایش مقیاس را برای اکسترودرهای دو مارادونه بیان می‌کند و شامل مواردی چون پروفایل دمایی اکسترودر برای پلیمرهای پرمصرف، سرمایه‌ش و گرمایش، راه‌اندازی و از سرویس خارج کردن فرایند، روش‌های پاک‌سازی به همراه مواد پاک‌کننده سیلندر و مارادونها و شرایط اکستروژن برای چند پلیمر پرمصرف است.

فصل ۹ در این فصل مرکز توجه ما پاسخ به این سؤال خواهد بود که روش‌های شناخت و حل مشکلات اکستروژن چیست؟ و چگونه حل می‌شوند؟ که در این رابطه پنج گام برای حل مشکلات فرایند را با ذکر یک مثال بیان شده است. عیب‌یابی و

رفع مشکلات اکستروژن در دو بخش (مشکلات مکانیکی و فرایندی) بررسی می‌شود و در پایان برخی از مشکلاتی عمومی رایج، با ذکر راه حل آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

# بخش ۱

## تعاریف و کلیات

اکستروود کردن نوعی روش شکل‌دهی است که در آن گرانول یا پودر ماده پلیمری به‌طور پیوسته به محصولات از قبیل فیلم، صفحه، لوله، نخ... تبدیل می‌گردد. دستگاهی که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد اکستروودر نامیده می‌شود.

واژه اکستروژن به مجموعه فعالیت‌هایی اطلاق می‌شود که شامل تجهیزات خوراک‌دهی، اکستروودر، قالب یا دای در فرآیندهای شکل‌دهی پیوسته مواد از طریق عبور دادن مذاب پلیمری از درون یک دای است و یکی از وسیع‌ترین کاربردهای واحد بهره‌برداری در فرآیندهای پلیمری است «هدف از انجام فرآیندهای اکستروژن تولید محصول باکیفیت تعیین‌شده در موعد مقرر برای مشتری است و این حقیقت که اکستروودر در فرآیندهای اکستروژن

می‌تواند به پنج هدف بامنظور متفاوت جهت دست‌یابی به محصول باکیفیت مناسب نقش داشته باشد بر کسی پوشیده نیست.

- دمای مناسب برای ذوب پلیمر
- دمای ثابت و یکنواخت برای ذوب پلیمر
- فشار صحیح مذاب پلیمری در دای
- فشار ثابت و یکنواخت مذاب در دای
- یکنواخت سازی و اختلاط مناسب مواد خوراک جهت تولید محصول

در این کتاب سعی کرده‌ایم علاوه بر تشریح تجهیزات اکسترودر، رفتار پلیمر در اکسترودر را برای رسیدن به بهینه‌سازی فرآیندهای اکستروژن بیان کنیم. چراکه دانستن سادگی کار، اصول بهره‌برداری و عملکرد تجهیزات در رسیدن به اهداف



تعیین شده کافی نیست و شناخت پلیمرها، آگاهی نسبت به واکنش‌ها و رفتار آن‌ها در فرآیندهای مختلف، اشکالات فرآیندی و تجهیزات و اثر متقابل آن‌ها روی مواد و خواص مواد بسیار مهم است.

فرآیند اکستروژن مزایا و تکنیک‌های عملیاتی تولید انواع پلاستیک‌ها را فراهم می‌کند که نسبت به سایر فرآیندها از نظر اهمیت اقتصادی ارجح است. در سرتاسر جهان خطوط تولید اکسترودرها بزرگ‌ترین و مهم‌ترین خط تولید ماشین در صنعت پلاستیک‌ها هستند. دامنه کاربرد وسیع و تولید پیوسته محصولات در مواجهه با چالش‌های جدید بازار، دو دلیل عمده است که اکسترودرها را برای تولیدکننده‌ها و بازار با اهمیت کرده است. البته فرآیندهای ناپیوسته (بچ) در تولید پلاستیک‌ها وجود دارد که شامل قالب‌ریزی دمشی، قالب‌ریزی تزریقی و... است.

زمانی که متغیرهای مستقل هنگام اکستروژن تغییر می‌کنند، تعیین و شناخت اثر آنها بر تجهیزات بالادست و پایین‌دست و محصولات حائز اهمیت است. متغیرهایی مانند دما، فشار و زمان که وابسته به میزان تولید و هزینه‌ها هستند. تمام فرآیندها از نظر کلیات دارای یک طرح هستند که مستلزم برهمکنش و کنترل مناسب شرایط عملیاتی خاص هستند.

هر فرآیند مراحل مختلفی دارد که تمامی آنها باید به خوبی شناسایی و هماهنگ شوند که از یک دیدگاه کلی شامل:

- ۱- طراحی یک محصول با فراهم‌سازی شرایط کاربرد و تولید آن با کمترین هزینه
- ۲- تعیین مواد پلاستیکی مناسب

۳- تأمین تجهیزات کامل خط تولید توسط

الف) طراحی قالب بندی محصول

ب) قرار دادن قالب در موقعیت مناسب با  
اکسترودر

ج) کارگذاری تجهیزات کمکی (تجهیزات  
بالادست و پایین دست) تا مطابق عملیات، خط  
تولید کامل شود.

د) اعمال کامل عوامل کنترل کننده (مانند  
کیفیت، عیب یابی و نقص در محصول)

و) خریداری و انبار کردن مناسب مواد اولیه  
نوع اکسترودر و ساختار آن:

در صدها اخیر، انواع مختلفی از اکسترودرها  
که طراحی و ساخته شده اند که دامنه وسیعی از  
محصولات پلاستیکی را تولید میکنند. مبنای کار

آن‌ها عملکرد مارادون درون سیلندر است که منجر به عملیات برش (که باعث تولید گرما و ذوب پلیمر می‌شود) روی پلاستیک‌ها می‌شود.

اکسترودرهای تک مارادونه نوع معمول و بسیار معروف از انواع اکسترودرهاست که در طرح‌های مختلف و برای استفاده‌های گوناگون استفاده می‌شود. نوع دیگر و پیشرفته‌تر اکسترودرهای دو مارادونه است.

اکسترودرهای تک مارادونه و چند مارادونه باهم تفاوت‌هایی دارند (جدول الف)

مزایای هر کدام به فرآوری پلاستیک موجود در فرآیند و محصولات تولیدی بستگی دارد. زمانی که مزایای مشترک داشته باشند می‌توان هر دو نوع را بکار برد. نوع اکسترودر به فاکتورهای هزینه، نظیر هزینه تولید یک محصول (باکیفیت) هزینه تجهیزات

و هزینه نگهداری بستگی دارد.

اکسترودرهای مشابه از سازندگان مختلف و حتی آنهایی که در فرآیندهای شکل‌دهی از ترموپلاستیک‌های یکسانی استفاده می‌کنند اغلب نیاز به تنظیمات متفاوت برای تولید محصول یکسان دارند. این موضوع حتی زمانی که طراحی مارادون‌ها یکسان باشد نیز مطرح است.

جدول الف مقایسه اکسترودرهای تک مارادونه  
و دو مارادونه

تک مارادونه	دو مارادونه	
کشنده	نزدیک به جابجایی مثبت	نوع جریان
متوسط /پهن	پایین / باریک (معمولاً برای واکنشی)	توزیع، زمان، اقامت
دبی را کاهش می دهد	ناچیز/ اثر تأخیر انداز روی دبی دارد.	اثر جریان فشاری (فشار برگشتی روی دبی اکسترودر)

دو مارادونه	تک مارادونه	
پایین (معمولاً برای PVC)	بالا (معمولاً برای پلیمرهای مقاوم)	برش در کانال
خوب (معمولاً برای آمیزه کاری)	فقیر / متوسط	اختلاط کلی (شامل همه نوع اختلاط)
پایین (بیشتر انتقال حرارت بصورت هدایتی دارد)	بالا (ممکن است آدیاباتیک باشد)	توان جذب و تولید گرما

دو مارادونه	تک مارادونه	
متوسط (محدودیت دبی)	بالا (محدوده کننده آن، دبی ذوب، پایداری حرارتی و...)	ماکزیمم سرعت مارادون
پایین (فشار محدود)	بالا	توانایی ایجاد فشار
پیچیده	تنومند، ساده	ازلحاظ ساخت مکانیکی
بالا	متوسط (میانه)	هزینه



علت اختلاف می‌تواند شامل عواملی از قبیل تغییرپذیری پلاستیک (بسیار مهم است)، عدم یکنواختی ابعاد داخلی سیلندر، موقعیت حس‌گرهای کنترل‌کننده، مقدار توان متغیر یا محدود برای سیستم گرمایشی، نرخ جریان سیال خنک‌کننده و غیره باشد.

اکستروژن باکیفیت خوب نیازمند موارد زیر است:

۱. تجهیزات بالادستی در تحویل کنترل‌شده ترموپلاستیک به قیف خوراک

۲. در ترم‌های پروفایل دمایی جهت ذوب و اختلاط همگن‌سازی خوبی توسط اکسترودر به همراه نرخ جریان دقیق و پایدار ایجاد شود.

۳. طراحی مناسب دای

۴. کنترل دقیق تجهیزات جریان پایین دست  
برای خنک کردن و بازدهی تولید.

از نیمه دهه ۱۹۸۰ موضوع جدیدی در زمینه اکسترودرها اختراع نشده و ایده‌های اولیه توسط پیشگامان اصلی در تجارت شکل‌دهی پلاستیک‌ها توسعه یافت. سرعت خروجی و مقدار تولید در اکسترودرها بستگی به مشخصات اکسترودر و نوع پلاستیک مورد استفاده دارد. اکسترودرهای در دسترس، محدوده ای وسیع از مقدار تولید و کارایی را دارند که وابسته به هزینه و ساخت اکسترودر است و همین موضوع برای تجهیزات کمکی صادق است. باید به این نکته توجه کرد که به دلیل تنوع محصولات، پردازش و تولید پلاستیک‌ها متفاوت خواهد بود بنابراین نمی‌توان یک سرعت خروجی مشخصی (که یک پارامتر مهم است) را برای یک ماشین تعیین کرد مگر اینکه برای یک خط

اکستروژن مشخص از یک پلاستیک خاص استفاده شود که در نتیجه محدوده‌ای از سرعت خروجی حاصل می‌شود.

فاکتورهایی از قبیل طرح هندسی مارادون، نوع کنترل‌کننده‌ها، نیروی محرکه و وابستگی میزان تولید به هزینه‌های عملیاتی از عوامل مهم در تعیین خصوصیات اکسترودرها می‌باشند. هزینه‌ها شامل هزینه‌های معمول دستگاه، نیروی برق مصرفی، نیروی کارگری، هزینه‌های کلی دستگاه، تعمیر و نگهداری، مدت توقف و رکود تولید و هزینه‌های متفرقه است. گران‌تر بودن اکسترودر بستگی به ظرفیت تولید آن دارد که هزینه خریداری را توجیه می‌کند.

در انتخاب سائز اکسترودر و نیرومحرکه آن ملاحظات باید در نظر گرفته شود که شامل موارد

زیر است:

۱. محدوده سرعت موردنیاز مارادون
۲. تغییرات سرعت مارادون با توجه به احتیاجات تولید دارای یک سرعت خاص و یا چندین محدوده سرعت
۳. ماکزیمم انرژی موردنیاز وابسته به ذوب و پردازش پلاستیک.
۴. ارتباط لازم بین سرعت و گشتاور مارادون
۵. دستگاه برای تولید یک محصول یا چندین محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیرو محرکه شامل: الکتروموتور، گیربکس کاهنده سرعت که انتقال از سرعت بالا به سرعت‌های پایین‌تر را آسان می‌کند. سیلندرها پوششی برای مارادون‌ها هستند.

مارادون باید با دیوارهای داخلی سیلندر تماس داشته باشد تا پمپاژ و عمل ذوب مواد پلیمری را به خوبی انجام دهد. فاصله بین نوک دنده‌های مارادون و جداره داخلی سیلندر با توجه به نوع پلیمر و ظرفیت اکسترودر تغییر می‌کند، عامل اساسی در پمپاژ هنگام فرآیند اکستروژن برهمکنش بین دنده‌های مارادون در حال چرخش و دیواره ساکن سیلندر است. اگر قرار باشد مذاب به‌طور کامل به سمت جلو انتقال داده شود میزان اصطکاک بین پلیمر و سطح مارادون باید کم و اصطکاک بین پلیمر و دیواره سیلندر باید زیاد باشد. اگر چنین عملی انجام نشود پلاستیک مذاب ممکن است با مارادون بچرخد و به سمت دای حرکت نکند.

داشتن یک سیستم خوراک‌دهی با سطح کنترل مناسب وزنی یا حجمی یک مزیت خوب برای فرآیند اکستروژن است. سیستم‌های خوراک‌دهی مختلفی

متناسب با نوع استفاده اکسترودرها در دسترس هستند. پلیمر جامد از طریق سیستم خوراک‌دهی وارد دهانه خوراک و سپس وارد کانال‌های مارادون می‌شود و تحت عوامل پیچیده‌ای به سمت جلو حرکت داده می‌شود. این عوامل بر میزان و سرعت خروجی تأثیر می‌گذارند. علاوه بر آن عوامل دیگری از قبیل فشارهای جانبی قبل از عملیات اصلی (ذوب کردن) بر کاهش تولید تأثیرگذار هستند که با چند درجه اختلاف در صحت این فشارها قابل محاسبه هستند. با این حال آن چیزی که محاسبات را کارآمد و به واقعیات نزدیک‌تر می‌کند انجام آزمایش است.

بخش خمیر کننده مارادون در اکسترودرهای تک مارادونه شبیه یک مخروط با شکاف‌های حلقوی با شیارها و کانال‌هایی است که گاه می‌تواند به صورت آدیاباتیک نیز عمل کند «اکسترودر آدیاباتیک ماشینی است که عملیات گرمای موردنیاز خودش

را خودش تأمین کند. بعد از آنکه اکسترودر به طور مناسبی جهت ذوب پلاستیک گرمای اولیه داده شده باشد به این نوع اکسترودرها، خود گرم کننده نیز می گویند». بخش خمیر کننده در اکسترودرهای دو مارادونه به صورت رینگ‌های پارویی شکل در طرح‌ها و اشکال هندسی مختلفی در دسترس است.

## عملیات اکسترودرها:

مقدار پلیمر مذاب حمل شده توسط مارادون در تخلیه آزاد (بدون هیچ گونه فشاری در سیلندر) تقریباً نصف حجم کانال‌های در حال چرخش مارادون است؛ زیرا علاوه بر کاهش دانستیه بالک مذاب نسبت به پلیمر جامد در جریان انتقال از جامد به مذاب، این سطح محل تماسی است که مذاب با مارادون و دیواره داخلی سیلندر دارد. بنابراین

سرعت انتقال میانگین سرعت بین دو سطح است. در جریان تخلیه آزاد از اکسترودر فقط یک جریان کشنده وجود دارد که وابسته به ابعاد و سرعت مارادون است. هنگام ذوب پلیمر در طول اکسترودر، سرعت خروجی آن با میزانی که جریان برگشتی یا فشاری خوانده می‌شود کاهش می‌یابد از نظر کمیتی این کاهش قابل محاسبه است. این جریان فشاری مذاب را به سمت عقب هدایت می‌کند که بستگی به ابعاد کانال، فشار و ویسکوزیته مذاب دارد. سرعت مارادون مستقیماً این جریان را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد بلکه تغییرات در سرعت مارادون جریان فشاری را نسبت به ویسکوزیته مذاب تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جریان نشتی در طول دنده‌های مارادون (که باعث می‌شود مقداری از مذاب از یک کانال به کانال ماقبل خود بریزد) در جهت تغییرات فشار وجود



دارد که میزان خروجی مؤثر را کاهش می‌دهد این کاهش جریان به دلیل کم بودن معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود هنگامی که از مارادونهای فرسوده استفاده می‌کنیم و یا مقاومت فشاری بالایی برای قالب یا دای وجود دارد این جریان نشتی اهمیت پیدا می‌کند و از دبی اکسترودر می‌کاهد که منجر به افزایش مزیت‌های عملیاتی برای تولید برخی از محصولات می‌شود. همچنین می‌تواند باعث تغییر در ابعاد و خواص محصول شود. در این حالت باید به عواملی چون مزیت مارادون جدید یا ترمیم آن، زمان طول عمر مفید مارادون توجه کرد.

هنگامی که توسعه فرآیند اکستروژن از نظر تئوری مدنظر است باید مانند سایر فرآیندها از اصول مشخص شروع و فرضیات تئوری را جهت رسیدن به اهداف خاص ثابت کرد. این شیوه در گسترش ظرفیت و افزایش راندمان اکسترودرها مورداستفاده

قرار گرفته است. بنابراین فهم عملی به سخت‌افزارها و نرم‌افزارها اعمال شد. افراد آزمایش‌کننده ادامه دادند تا به فهم بهتری از فرضیات پایه و آنالیز تئوری رسیدند. با این عمل اکسترودرها نسبت به گذشته ارتقا یافته و ماشین‌های عملیاتی با ظرفیت بالاتر و کاهش هزینه برای عملیات پردازش پلاستیک‌ها را فراهم کردند این کاهش هزینه شامل بهبود و کنترل ذوب، مصرف کمتر انرژی، کاهش زمان تعمیر و نگهداری و... بود.

شرایط حدی تئوری عملیات اکسترودرها به‌طور تجربی در بین ناحیه‌های خوراک و ذوب انجام می‌شود که تخمین آن‌ها مشکل است و به همین علت درصد اندکی قابلیت مرتبط کردن را دارند. به‌عنوان مثال مقدار خروجی (محصول) بدون در نظر گرفتن طول مارادون و عمق کانال‌ها را می‌توان به‌عنوان یک واحد مجزا در نظر گرفت. تحقیقات

اکستروژن با قوانین ریاضی، ترمودینامیک و علم تغییر شکل ماده، گسترش یافت و استفاده از خطوط اکستروژن را عملی کرد. معمولاً ماده خوراک با استفاده از نیروی وزن (که معمولاً به صورت وزنی کنترل می‌شود) از قیف خوراک به سمت درگاه خوراک‌دهی رو سیلندر جریان می‌یابد و زمانی که مارادون شروع به چرخش می‌کند پلاستیک را به درون کانال انتقال می‌دهد.

نیروی اصطکاک درونی پلاستیک هنگام ذوب افزایش می‌یابد که باعث تسریع در حرکت روبه جلو مذاب می‌گردد. شروع عملیات جایی است که پلیمرها در حالت جامد و با دمایی زیر نقطه ذوب هستند و زمانی که دمای پلیمر بالاتر از دمای ذوب آن می‌رود عمل ذوب آغاز می‌شود. یک فیلم مذاب بر روی سطح داخلی سیلندر تشکیل می‌شود. حالت جامد خوراک با عبور از ناحیه انتقال کاهش می‌یابد و

بعد از آن ناحیه سنجش مذاب را به سمت دای پمپ می‌کند پلیمر مذاب در دای یا قالب شکل می‌گیرد و خنک می‌شود قالب یک مقاومتی را در مقابل جریان نشان می‌دهد بنابراین فشار مذاب در ناحیه سنجش مورد نیاز است تا مذاب را وارد قالب کند. مقدار فشار جهت غلبه بر مقاومت قالب با استفاده از میزان باز بودن دهانه قالب، ابعاد قالب، دمای مذاب، خواص پلیمر و سرعت جریان مذاب در هنگام ورود به قالب تعیین می‌شود.

عملیات اکسترودر در شرایط زیر می‌تواند صورت گیرد:

۱. مستلزم عملیات گرمادهی به اکسترودر و تنظیم تجهیزات بالادست و پایین دست است.

۲. شامل شرایط عملیاتی مورد نیاز برای حصول

به محصول با حداقل هزینه

### ۳. حل مشکلات خط تولید

یک عملیات موفق نیازمند توجه دقیق به بسیاری از جزئیات مانند کیفیت مذاب، پروفایل دمایی مناسب با گرید تولیدی، تولید حداقل ضایعات و... است.

جدول (ب) فشار مذاب در دای را برای بعضی از فرآیندهای اکستروژنی نشان می‌دهد.

## فشار مذاب در دای

فرآیند	PSi	MPa
فیلم دمشی	۱۰۰۰-۵۰۰۰	۶,۹-۳۴,۵
فیلم قالب گیری	۲۰۰-۱۵۰۰	۱,۴-۱۰,۴
صفحه	۲۰۰-۱۵۰۰	۱,۵-۱۰,۴
لوله	۴۰۰-۱۵۰۰	۲,۸-۱۰,۴
روکش کابل	۱۰۰۰-۵۰۰۰	۶,۹-۳۴,۵
نخ	۱۰۰۰-۳۰۰۰	۶,۹-۲۰,۷

از نظر تنظیمات دمایی هر نمونه از خانواده پلاستیک‌ها از قبیل پلی اتیلن (PE)، پلی ونیل کلراید (PVC)، پلی پروپیلن (PP) و یا هر نمونه دیگر می‌تواند یک پروفایل دمایی متفاوت جهت پردازش

در اکسترودر داشته باشد و با استفاده از آزمایش‌های عمدتاً تجربی شرایط تنظیم این پروفایل‌های دمایی به دست می‌آیند.

تضعیف یا اکسیداسیون بعضی از پلاستیک‌ها یک خطر بالقوه است که عملاً زمانی که اکسترودر در معرض خاموشی‌های مکرر قرار می‌گیرد رخ می‌دهد از این نظر مدت‌زمان توقف اکسترودر حتی از مدت‌زمان روشن بدون آن مهم‌تر است.

کتابچه‌های راهنمای عملیات واحد می‌تواند حاوی دستورالعمل‌ها و آموزش راه‌اندازی اکسترودر و تجهیزات کمکی و یا اطلاعات مربوط به ساختار مواد پلاستیکی باشند. مهم است که کارکنان آموزش‌های مناسب را درباره خط تولید از زمان شروع تا خاتمه عملیات دیده باشند و موقعیت‌های خطرناک و نایمن را بشناسند. آموزش صحیح می‌تواند بسیاری

از مشکلات را حل کند. برای اجتناب از اتفاقات ناگوار اجازه ندهید که تعدادی بیش از افراد لازم در اطراف خطوط عملیات با سرعت بالا و گرم بایستند.

احتمالاً هنگام تنظیم و نصب تجهیزات سیستم‌های کنترلی مهم به‌طور استراتژیک و هدفمند جایگذاری شده‌اند تا اپراتورها به راحتی بتوانند خط تولید را راه‌اندازی کنند. اپراتورها باید تنظیمات را نسبت به توانایی‌های عملیاتی چک کنند و بهترین اجرا و هزینه و خروجی را تخمین بزنند و اجرا کنند.

تمامی سیلندرها و دای و کنترل‌کننده‌های دمایی و تجهیزات کمکی را در دمای موردنظر تنظیم کنید و هیچ‌گاه از اکسترودر سرد شروع نکنید چراکه ممکن است آسیب‌های جدی به اکسترودر وارد شود حتی می‌تواند مارادون را شکسته و در سیلندر ترک



ایجاد کند. هنگامی که برای اولین بار بعد از نصب، دمای اکسترودر و دای را بالا می‌برید و بعد از اینکه دما به مقدار مورد نظر رسید، طرح آچار کشی پیچ و مهره‌ها را دوباره اجرا کنید تا قبل از شروع عملیات اکسترورژن از استحکام تمامی اتصالات اطمینان حاصل کنید.

راه‌اندازی اکسترودر باید با سرعتی باشد که اپراتور بتواند آن را کنترل کند زیرا ممکن است در مقایسه با سرعت‌های عملیات هدف‌دار خیلی آهسته باشد چرا که باید اجازه داده شود تا جریان مذاب پاک‌کننده بتواند به راحتی بر روی زمین جاری شود و سیلندرهای و سطح مارادون را از پلیمرهای تخریب‌شده در اثر حرارت پاک کند. متداول است که در زمان توقف، اکسترودر از مذاب پاک‌سازی گردد با این حال برای برخی پلاستیک‌های خاص سودمند است که اکسترودر پر نگه داشته شود.

مانند فرآیند تولید فیلم LDPE که ترجیح داده می‌شود اکسترودر پر از پلاستیک خاموش شود زیرا این عمل از ورود هوا و اکسیژن باعث اکسیداسیون پلاستیک مذاب، جلوگیری می‌کند اما پلیمری مانند PVC به راحتی توسط حرارت تجزیه می‌شود و در زمان توقف اکسترودر باید به طور کامل از اکسترودر خارج گردد. برای اطمینان از خروج کامل آن از اکسترودر معمولاً از یک پلیمری مانند LDPE به عنوان ماده پاک کننده استفاده می‌شود. این پلاستیک با نقطه ذوب پایین می‌تواند در سیلندر باقیمانده و در هنگام گرم کردن به آسانی ذوب شود.

دستورالعمل‌هایی برای توقف‌های موقتی نیز باید طراحی شوند که کاهش هزینه‌های غیرضروری توقف‌های موقت را در پی دارد (مانند عدم پاک‌سازی سیلندر برای توقف‌های موقت). دستور کار متداول برای توقف‌های موقت که نیاز به خالی