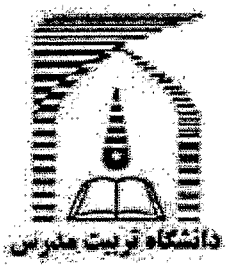
٩٣٢٧٥

۲۶۰



دانشکدهٔ فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامهٔ کارشناسی ارشد

کاویتاسیون در نازل انژکتور دیزل

بهرنگ اصغریان

۸۳۶۷۶۱۰۲۷

استاد راهنما: دکتر قاسم حیدری نژاد

۱۳۸۷ /۲/ ۵

۱۳۸۶-۱۳۸۵

۹۳۲۷۵

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، مغایر وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب دانشجوی رشته مقطع تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

۸۶/۱۱/۹

دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت وکرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی ومعنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح درمورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه و رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایید:

ماده۱: حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری ازآن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می‌باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

۸۶/۱۱/۲۱

تشکر و قدردانی

از دکتر حیدری نژاد (استاد راهنمای محترم) تشکر می‌کنم که این امکان را برای من فراهم کردند تا موضوع پایان نامه‌ام را خودم انتخاب کنم و با راهنماییهایشان در کاهش استرس و نگرانی من بسیار مؤثر بودند.

از آقای دکتر اشمیت[1]، استاد دانشگاه ماساچوست آمریکا[2]، بسیار تشکر می‌کنم که در بخش مدلسازی و اعمال شرایط مرزی پایین‌دست مرا راهنمایی کردند.

در پایان، از زحمات پدر و مادرم تشکر می‌کنم که مشوق اصلی من در ادامهٔ تحصیل بعد از دورهٔ کارشناسی بودند.

بهرنگ اصغریان

۸۳٦۷٦۱۰۲۷

۱۳۸٦/۲/۱۵

[1] David. P. Schmidt
[2] University of Massachusett

چکیده

کاویتاسیون عبارتست از افت فشار ناگهانی جریان سیالی با دمای T به زیر فشار بخار سیال در همان دمای T. هرچند که مهندسین با شنیدن نام این پدیده بیشتر به یاد پمپها می‌افتند، ولی درون هندسه‌هایی با تغییر مقطع ناگهانی- از بزرگ به کوچک- که سیال پرسرعت در آنها جریان دارد، مثل نازل انژکتور و اریفیس، نیز این پدیدهٔ مغشوش دیده می‌شود. بهینه سازی سیستمهای تزریق سوخت موتورهای احتراق داخلی می‌تواند به طور جدی در کاهش آلاینده‌ها مؤثر باشد. وظیفهٔ سیستم تزریق سوخت، تولید اسپری است. ویژگیهای اسپری، مستقیماً با احتراق سوخت مرتبط است. احتراق هم به نوبهٔ خود عامل اصلی تولید آلاینده‌هاست. با این حال ارتباط بین اسپری و آلاینده‌ها، چندان شناخته شده نیست. هدف از این پایان‌نامه، بررسی جریان درون نازل انژکتور و جریان خروجی از آن است که می‌تواند به شناخت بیشتر اسپری و نهایتاً شناخت بیشتر ارتباط اسپری و احتراق کمک کند.

این تحقیق با یک مرور تاریخی بر آنچه تا کنون در زمینهٔ کاویتاسیون انجام شده است آغاز می‌شود. سپس یک مدل تحلیلی برای جریان خروجی از نازل ارائه می‌گردد. پس از آن با اعمال فرضیاتی، جریان سوخت در نازل انژکتور دیزل با یک کد کامپیوتری CFD مدل می‌شود. نهایتاً صحت مدل اعمال شده با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.

واژگان کلیدی: کاویتاسیون، سوپرکاویتاسیون، عدد کاویتاسیون، ضریب تخلیه، انژکتور

فهرست

۱. مقدمه ۷

۲.مرور تاریخی ۱: کلیات ۱۰

۲. ۱. رفتار اسپری و تأثیر نازل بر آن ۱۰

۲. ۲. مطالعهٔ جریان درون نازل ۱۷

۲. ۲. ۱. آزمایش نازلهای شامل کاویتاسیون ۱۹

۳. مرور تاریخی ۲: روشهای متداول مدلسازی کاویتاسیون در نازل ۲٤

۳. ۱. مدلسازی یک بعدی کاویتاسیون در نازل ۲٤

۳. ۲. مدلسازی چند بعدی کاویتاسیون در نازل ۲۷

٤. یک مدل تحلیلی برای جریان خروجی از نازل ۳٦

٤. ۱.تئوری ۳٦

٤. ۲.کاربرد مدل وصحت آن ٤۱

۵. فیزیک کاویتاسیون و مدلسازی آن ٤۵

۵. ۱. ترمودینامیک دوفازی مسأله ۵۰

۵. ۲. بی بعد سازی معادلات حاکم ۵۳

۵. ۳. مدل مورد استفاده در این تحقیق ۵۵

۵. ۳. ۱. کلیات ۵۵

۵. ۳. ۲. حل عددی ۵۹

۵. ۳. ۳. ساختار کد و آلگوریتم آن ٦۹

٦. نتایج ۷۳

٦. ۱. بررسی صحت مدل ۷۳

٦. ۲. کانتورهای متغیرهای جریان و بردارهای سرعت ۷۵

٦. ۳. نتیجه گیری ۷۸

۷. منابع ۸۰

واژه‌نامه[1]

سطح مقطع نازل	A
سطح مقطع نازل در گلوگاه	A_c
ضریب کاهش سطح	C_c
ضریب تخلیهٔ نازل	C_d
قطر نازل	D
ژاکوبین تبدیل مختصات	J
عدد ژاکوب	Ja
عدد کاویتاسیون	K
طول نازل	L
دبی جرمی	$\dot{m}$
فشار بالادست	P_1
فشار پایین‌دست	P_2
فشار بخار	P_v
فشار محیط درون سیلندر	P_∞
فشار سکون جریان	P_0
شعاع کمان کنج ورودی نازل	R
Void fraction	α

[1] Nomenclature

جهت مختصات در فضای محاسباتی موازی دیوارهٔ نازل	η
چگالی بخار	ρ_v
چگالی مایع	ρ_l
جهت مختصات در فضای محاسباتی عمود بر دیوارهٔ نازل	ζ

۱.مقدمه

۱. مقدمه

بازار تولید وسایل نقلیهٔ موتوری و استفاده از آنها رو به گسترش است و این در حالیست که مسألهٔ آلودگی هوا در شهرهای بزرگ به صورت یک مشکل جدی درآمده است. دلایل این تضاد را می‌توان هم مربوط به فناوری و هم مربوط به فرهنگ شهرنشینی دانست. با توجه به نیاز شدید به حمل و نقل موتوری و نیاز جدی‌تر به هوای پاک؛ دغدغهٔ مهندسین، ساخت وسایل نقلیه‌ای با آلودگی کمتر است. تضاد این دو نیاز، در نیم قرن اخیر در کشور آمریکا به عنوان صنعتی ترین کشور جهان چشمگیرتر از باقی نقاط دنیاست. به گونه ای که از ۱۹۵۰ به بعد با افزایش اتوموبیلها و گسترش سیستم آزادراهها و اتوبانها، و همچنین توسعهٔ حومهٔ شهرهای بزرگ؛ مشکل دوری محل کار از منزل جدی‌تر شده و میل به داشتن خودروی شخصی بالارفت. در نتیجه آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ افزایش یافتند.

نوعی ازفناوری حمل و نقل که با بهینه سازی قادر است به هر دو نیاز مذکور پاسخ دهد، موتور دیزل است. موتور دیزل به دلیل مصرف سوخت ارزان و دوام بالایش در بسیاری از وسایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما متأسفانه معروف است که موتورهای دیزل، مقادیر زیادی از ذرات آلاینده[1] و اکسیدهای نیتروژن تولید می‌کنند. ذرات معلق آلاینده- که از این پس به اختصار ذرات نامیده می‌شوند- برای انسان سرطانزا بوده و اکسیدهای نیتروژن عامل اصلی تولید اسماگ[2](دود شدید که شبیه مه است) هستند. با توجه به این موارد؛ موتورهای دیزل باید بهینه شوند وگرنه استفاده از آنها در شهرهای بزرگ امکانپذیر نخواهد بود. این بهینه سازی امکانپذیر است([Ashley [1997).

یکی از روشهای کاهش ذرات و اکسیدهای نیتروژن، بهینه سازی عملکرد سیستم تزریق سوخت[3] است. هر چند که با دستکاری سیستم تزریق سوخت می‌توان به طور چشمگیری آلاینده‌ها را کاهش داد ولی این ارتباط هنوز چندان شناخته شده نیست. حتی ارتباط بین جریان سوخت در نازل انژکتور و شکل اسپری[4] درون سیلندر هم واضح نیست. دانستن این ارتباط دومی می‌تواند کمک بزرگی برای مهندسین باشد تا آلا یندهای موتور دیزل را کاهش دهند. مطالعهٔ جریان درون نازل انژکتور همواره با مشکلات مختلفی روبرو بوده است. طول نازلها حدود ۱

---

[1] Particulates
[2] Smog
[3] Fuel Injection system
[4] Spray

میلیمتر است و قطر آنها کسری از میلیمتر. جریان سوخت درون آنها سرعت بالایی دارد که از مرتبهٔ چند صد متر بر ثانیه است. از این گذشته؛ جریان، اساساً یک جریان گذراست چون تزریق سوخت در کسری از ثانیه انجام می‌شود. با وجود این مشکلات، بررسی مستقیم این جریان کار ساده ای نیست. مشکل دیگری که قرار است در این پایان نامه به آن پرداخته شود، دو فازی بودن جریان درون نازل است که پیچیدگی این جریان را بیشتر می‌کند.

در این پایان نامه، جریان سوخت، درون یک نازل انژکتور بررسی می‌شود. ابتدا نگاهی داریم به تحقیقاتی که تا به حال راجع به این موضوع انجام شده است. که این قسمت اهمیت کاویتاسیون و توربولانس را در جریان درون نازل آشکارتر می‌کند. سپس معادلات حاکم بر مسأله به نمایش گذاشته شده و روش حل عددی ارائه می‌گردد. در انتها نتایج حاصل از کد CFD نوشته شده برای مدلسازی کاویتاسیون در نازل انژکتور دیزل را بررسی خواهیم کرد.

۲.مرور تاریخی ۱:

کلیات

۲.مرور تاریخی[1] ۱: کلیات

مطالعات اولیه بر روی تشکیل اسپری به اندازهٔ موتورهای احتراق داخلی قدمت دارند. در ابتدا تئوریهای شکست اسپری[2] فقط برپایهٔ اثر متقابل[3] اسپری و جو اطرافش بنا شده بودند. پس از مدتی، وقتی اهمیت نازل آشکار شد؛ مدلهای اسپری از یک سری ضرایب تجربی برای نشان دادن اثر نازلهای مختلف در مدل، کمک می‌گرفتند. متأسفانه اثر متقابل اسپری و جوّ درون سیلندر همچنان ناواضح ماند که این امر خود باعث پیچیده‌تر کردن ارتباط بین نازل و اسپری شد. از آنجا که هیچ قسمتی از فرآیند شکست اسپری شناخته شده نبود؛ پیدا کردن تأثیر نازل و جو سیلندر را بر شکست اسپری مشکل می‌نمود. علاوه براینها، پیچیدگی جریان درون نازل، یافتن نقش نازل را در شکست اسپری دشوار می‌کرد. در این مدت نه تنها برای محققین آشکار شده که آشفتگی در جریان درون نازل وجود دارد؛ بلکه کاویتاسیون نیز نقش مهمی در نازل انژکتورهای با فشار بالادست زیاد بازی می‌کند.

۲. ۱. رفتار اسپری و تأثیر نازل بر آن

وظیفهٔ نازل در یک انژکتور تولید اسپری است. پس برای آنکه بدانیم چرا کاویتاسیون درون نازل احتیاج به مدلسازی دارد، شناخت اسپری ضروری است. یکی از پیشرفتهای مهم در شناخت اسپری، ارائهٔ یک مدل ریاضی برای شکست اسپری بود. Rayleigh [1887] نشان داد که در شکست، اغتشاشات بسیار کوچک جریان به سرعت رشد می‌کنند. رایلی مدلی ریاضی از شکست جت مایع غیر لزج ارائه کرد. او از تحلیل پایداری خطی شده[4] استفاده کرد و طول موج اغتشاشی که از همه سریعتر رشد می‌کند را مشخص کرد. Weber [1931] اثر لزجت را هم در این تئوری در نظر گرفت. Taylor [1940] از مدل لزج خطی شده برای پیش بینی اندازه قطرات استفاده نمود. بدین ترتیب که قطر قطرات را به طول موج موجهای ناپایدار ربط داد. Sterling [1975] & Sleicher کار انجام شده توسط رایلی و وبر را تعمیم دادند. تمامی این مدلها فقط برای جتهای با سرعت پایین مناسب بودند که جریان سیال خروجی از نازل در مورد آنها، جریانی هموار و آرام است.

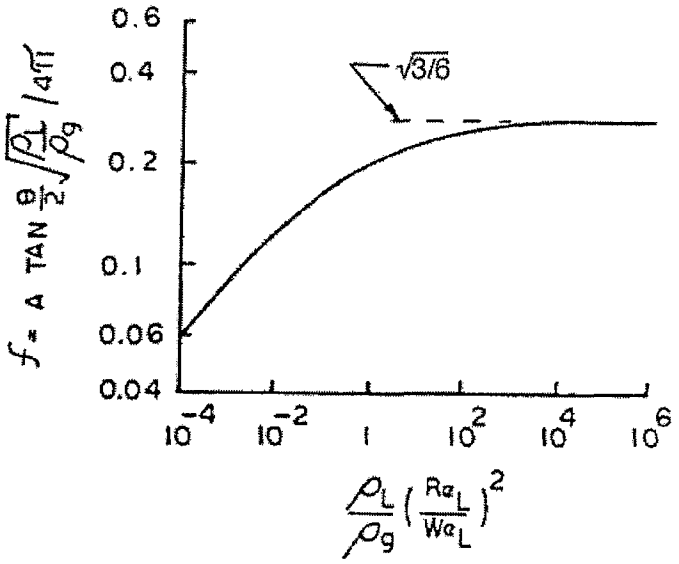
---

[1] Historical Overview
[2] Spray Breakup
[3] Interaction
[4] Linearized stability analysis

Ranz [1958] سعی کرد تا کار تیلور را با در نظر گرفتن اثر نازل گسترش دهد. وی این نظریه را ارائه نمود که نازل به جریان اغتشاشات کوچکی را منتقل می‌کند که بزرگی این اغتشاشات می‌تواند به زاویهٔ اسپری (θ) ربط داشته باشد. او فرض کرد که سرعت رشد اغتشاشات به طور خطی متناسب است با سرعت شعاعی[1] قطرات اسپری[2]. از سوی دیگر، سرعت محوری[3] قطرات را برابر سرعت متوسط خروج سیال از نازل(U) فرض کرد. تاثیر نازل در ضریب تناسب A نشان داده می‌شود. و فرمول زیر حاصل می‌شود:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{4\pi}{A}\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}F\left\{\frac{\rho_l}{\rho_g}\frac{\sigma^2}{\mu_l^2U^2}\right\} \qquad (۲-۱)$$

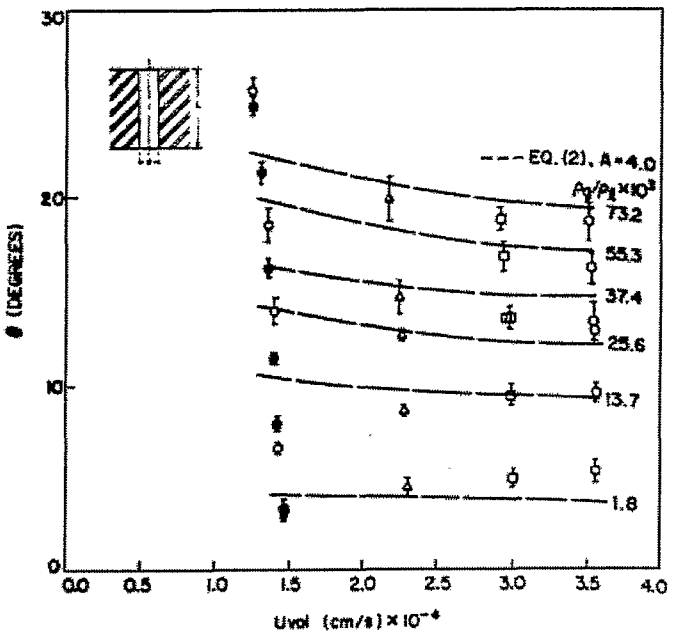
F یک تابع تحلیلی است که در مقاله تیلور آمده است و در شکل ۱-۲ آمده است:



شکل ۱-۲: F، تابع تحلیلی Taylor

این رابطه به شرطی که A مناسب برای هر نازل مشخص شود با رفتار نازلهای مختلف مطابقت می‌کرد. Wu [1983] سعی کرد صحت رابطهٔ Ranz را بررسی کند. شکل ۲-۲ نتایجی را نشان می‌دهد که Wu برای انواع نازلها بدست آورد.

[1] Radial Velocity
[2] Spray droplets
[3] Axial Velocity



شکل ۲-۲: رابطه زاویه نازل از مقاله Wu et al. در ۱۹۸۳

واقعیت این بود که Ranz، رابطه ای بین هندسه نازل و رفتار اسپری ارائه ننمود. Reitz & Bracco [1982] در تحقیقاتشان به رابطهٔ Ranz برخورد کردند و کشف کردند که مقدار A به طرز قابل توجهی به هندسه نازل مربوط است و مقدار آن بین ۳/۱ تا ۲۸ تغییر می‌کند . به نظر می‌رسید که مقدار A با شدت توربولانس کاهش می‌یابد. از این رو می‌توان گفت که Ranz، رابطه ای خام ولی در عین حال کنجکاو کننده بین جریان داخل نازل و اسپری ارائه کرد.

Arcoumanis, et al. [1997] یک مدل چندبعدی[1] برای اسپری معرفی کردند که دراین مدل اثرات بالا دست نیز لحاظ شده بود. ولی برای مدل کردن سیستم تزریق سوخت از یک مدل یک بعدی گذرا[2] استفاده کرده بودند مدل آنها قادر بود فشار را در هر لحظه درون پمپ و انژکتور ونازلهای آن محاسبه کند. آنها برای ضریب تخلیه[3] از روابطی بهره گرفتند تا تخلیه هر نازل را جداگانه محاسبه کنند. که این روابط اثرات زاویه سوراخهای انژکتور (همان نازلها)، طول نازل، شعاع کنج ورودی[4] و کاویتاسیون را به حساب آورده بودند. از ضریب تخلیه برای پیش بینی جریان خروجی[5] و محاسبهٔ سطح موثر[6] و سرعت موثر[1] جت خروجی از نازل استفاده می‌شد. آنها همچنین

1 Multi-dimensional model
2 One-dimensional transient model
3 Coefficient of discharge
4 Inlet corner radius
5 Efflux
6 Effective area

موفق شدند به کمک روابطی انرژی جنبشی و نفوذ پذیری[2] را در خروجی نازل محاسبه کنند. در حقیقت می‌توان گفت که Arcoumanis و همکارانش متغیرهای جریان را در خروجی با یک سری تقریب به اسپری ربط دادند. آنها فرض نمودند که شعاع حبابهای کاویتاسیون که از نازل خارج می‌شوند برابر اختلاف شعاع نازل و سطح جت موثر خروجی است.

مدل Arcoumanis [1997] از این نظر که رفتار گذرای تزریق سوخت و کاویتاسیون و توربولانس را باهم شامل می‌شود، یک مدل کامل است. اما نکته اینجاست که برای لحاظ کردن این پدیده‌ها به فرضیات زیادی احتیاج است. این مدل برای تخمین تخلیه نازل و شکست اسپری[3] حداقل از ۱۲ ثابت تجربی استفاده می‌کند. این مدل پیشرفتی در درک و فهم شکست اسپری حاصل نکرده است. بلکه توانسته ارتباط بین سیستم تزریق سوخت و رفتار نازل را با جریان پایین دست خارج نازل نشان دهد.

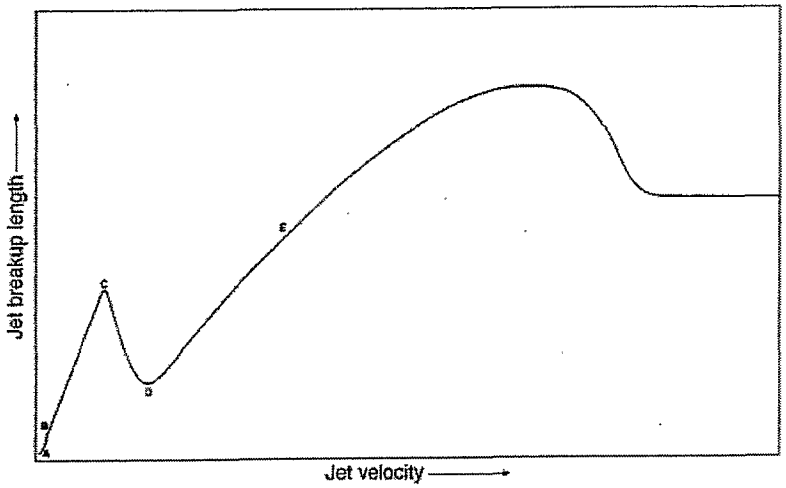
همزمان با محققینی که تئوری مساله را پیش می‌بردند؛ محققین دیگری در آزمایشگاه در همین زمینه انبوهی از داده‌های آزمایشگاهی فراهم کردند. Arcoumanis [2001] هم داده های تجربی‌اش را ارائه کرد. این داده‌ها عمدتاً شامل زاویهٔ اسپری، اندازهٔ قطرات[4] و طول شکست اسپری[5] بود وسعی آزمایشگاهیان بر این بود که رابطهٔ بین آنها و سرعت تزریق[6]، هندسهٔ نازل[7]، فشار تزریق[8]، چگالی گاز درون سیلندر[9] و بقیه پارامترها پیدا کنند. این تحقیقات توسط محققین زیر انجام شد:

McCarthy and Malloy[1974], Reitz[1978], Wu et al.[1983], Arai et al.[1984], Ruiz[1987], Ohrn et al.[1991], Karasawa et al.[1991], Ruff et al.[1992], Dodge et al.[1992], Badock [1999], Arcoumanis[2001], and Sato et al. [2001]

---

1 Effective velocity
2 Diffusivity
3 Spray breakup
4 Drop size
5 Breakup length
6 Injection velocity
7 Nozzle geometry
8 Injection velocity
9 Ambient gas density

علت این همه تحقیقات مشابه را می‌توان پیچیدگی آنچه دانست که در خلال این آزمایشها مشاهده می‌شد. همانطور که در شکل ۳-۲ مشاهده می فرمایید، نمودار شماتیک طول شکست به ازای سرعت جت خروجی فراز و نشیبهایی دارد که معرف ترکیبی از مکانیزمهای مختلف است که با هم در سیستم تاثیر گذار هستند.



شکل۳-۲: نمودار شماتیک طول شکست اسپری، از مقالهٔ McCarthy & Malloy در سال ۱۹۷٤

بحث راجع به این نمودار از حوصلهٔ این تحقیق خارج است و در اینجا تنها به این نکته توجه می‌کنیم که برخی از محققین علت پیچیدگی این نمودار را به کاویتاسیون درون نازل ربط داده‌اند. به عنوان مثال Hiroyasu et al.[1991] رفتار این نمودار را به کاویتاسیون و جدایش هیدرولیکی[1] ربط داده‌اند. جدایش هیدرولیکی عبارتست از جدایش کامل جریان درون نازل از دیوارهٔ درونی نازل.

آزمایشاتی نیز انجام شده که اهمیت کاویتاسیون را در شکست اسپری نشان می‌دهد. در بسیاری از این آزمایشها جدایش هیدرولیکی نیز مشاهده شده است و اساساً جدایش هیدرولیکی زمانی مطرح گردید که مشاهده شد جریان در کنج ورودی نازل از دیواره جدا می‌شود و دوباره به آن نمی‌چسبد. و این باعث می‌شود که گاز درون سیلندر به درون نازل وارد شده و فضای خالی ناشی از جدایش را پر کرده و سوخت را احاطه کند. اضافه شدن این پدیده به مساله، پروسهٔ شکست اسپری را پیچیده‌تر می‌کند. برخی از محققینی که این آزمایشات را انجام داده اند عبارتند از:

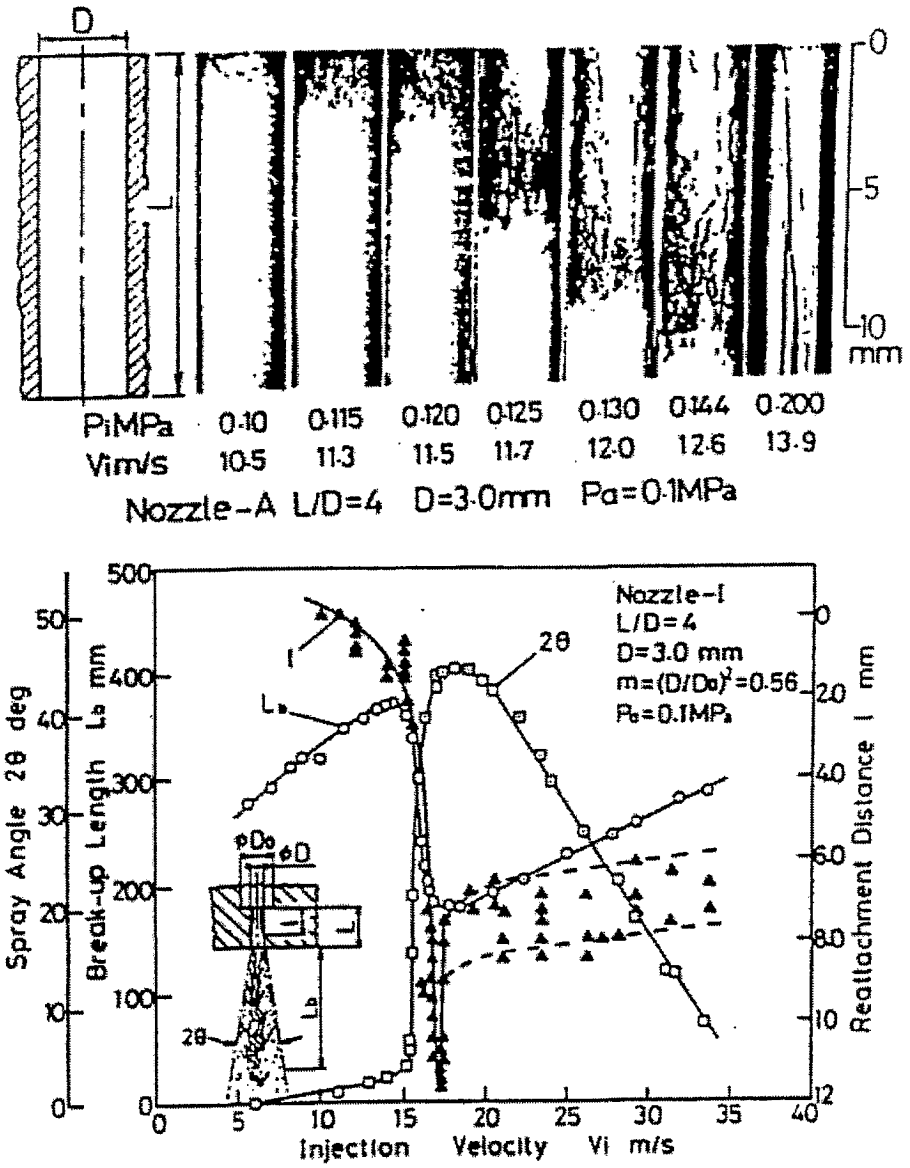
[1] Hydraulic flip

Bergwerk [1959], Hiroyasu et al. [1991], Arai et al. [1994], Bode [1991], Soteriou et al. [1995], and Ganippa [2001]

همهٔ این محققین در این مورد اتفاق نظر داشتند که با شروع کاویتاسیون، رفتار اسپری به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. همگی اعتقاد داشتند که با حضور کاویتاسیون، زاویه مخروط اسپری به مقدار زیادی افزایش یافته و طول شکست کاهش می‌یابد. هرکدام برای مشاهدهٔ کاویتاسیون از نازلهای شفاف کمک گرفتند. Arai و Ganippa و Soteriou نازلهای بزرگتر از اندازهٔ واقعی[1] و نازلهای با اندازهٔ واقعی[2] را با هم مقایسه کردند در حالیکه Bode به بررسی دقیق نازلهای با اندازهٔ واقعی بسنده کرد. شکل ٤-٢ نشان می‌دهد که چگونه پارامترهای مختلف همزمان در سرعت ۱۷ m/s برای نازلی به قطر ۳mm تغییر می‌کنند. گسترش کاویتاسیون تا خروجی باعث تغییرات قابل توجهی در طول شکست، L_b، و همچنین زاویه اسپری، 2θ، می‌شود. Arai آزمایشهایش را برای نازلی به قطر ۰,۳ mm انجام داد و همان روند را مشاهده کرد.

حال به بررسی جریان درون نازل می‌پردازیم.

[1] Large scale nozzles
[2] Real scale nozzles



شکل٤-٢: مشاهدهٔ کاویتاسیون در نازل، از مقالهٔ Arai et al.[1991] و Hiroyasu et al. [1991]- شکل بالا عکس کاویتاسیون در نازل است و جریان در آن از بالا به پایین است.