

## مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هواده‌ی شده در نسبت‌های هواده‌ی بالا

زهرا علیزاده کاکلر<sup>۱\*</sup>، محمدرضا انصاری<sup>۲</sup>، محمدعلی سرودی<sup>۳</sup>

۱- دکتر، مهندسی مکانیک، واحد طراحی، دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، z.alizadeh@turbotec-co.com

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، mra\_1330@modares.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، مدیر دپارتمان احتراق، شرکت توربوتک، تهران، m.soroudi@turbotec-co.com

\* نویسنده مخاطب

### چکیده

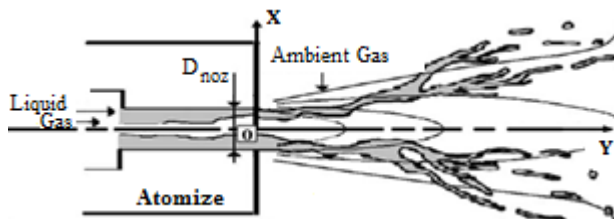
در بسیاری از اتمایزرها شکست ورقه حلقوی مایع خروجی از اتمایزر مسئول تشکیل اسپری و تعیین مشخصه‌های اسپری حاصل است. مقاله حاضر به مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع خروجی از اتمایزر مایع هواده‌ی شده، به منظور درک بهتر فرآیند شکست اولیه در این نوع اتمایزر، در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع بالا پرداخته است. بدین منظور معادله پراکندگی بدست آمده از تحلیل پایداری خطی سه بعدی، برای شرایط جریان ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هواده‌ی شده در نسبت‌های هواده‌ی بالای ۱/۲۴٪ و ۱/۸۴٪، حل شده است. نتایج حل نشان دادند که، در نسبت‌های هواده‌ی مورد بررسی، مدهای اغتشاشی متقارن محوری شبه‌سینوسی مدهای اغتشاشی غالب در شکست ورقه حلقوی مایع خروجی از این نوع اتمایزر هستند. علاوه بر این، مشاهده شد که با افزایش نسبت هواده‌ی، شکست ورقه مایع در طول موج‌های کوتاه‌تری رخ خواهد داد. همچنین نتایج مربوط به بررسی اثر لزجت روی ناپایداری ورقه حلقوی مایع نشان دادند که لزجت مایع تا حدی اثر پایداری‌کنندگی داشته و غیرلزجت فرض کردن مایع در نسبت‌های هواده‌ی بالا می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات مربوط به پایداری ورقه حلقوی و طول شکست مربوط به آن شود.

**کلمات کلیدی:** ناپایداری خطی، ورقه حلقوی مایع، اتمایزر مایع هواده‌ی شده، دبی جرمی گاز به مایع

### مقدمه

اتمیزاسیون سوخت در سیستم‌های احتراقی عمدتاً توسط اتمایزرهای فشاری، فشاری چرخشی و یا دو سیالی انجام می‌شود. مزایایی از قبیل نیاز به فشار پایین‌تر سوخت، اسپری ریزتر و انتشار کمتر آلودگی، باعث کاربرد گسترده اتمایزرهای دو سیالی شده است [۱]. از طرف دیگر، اتمایزرهای دو سیالی اختلاط داخلی، که در آن‌ها برخورد بین گاز اتمیزه کننده سرعت بالا و مایع درون بدنه اتمایزر اتفاق می‌افتد، به دلیل کیفیت اتمیزاسیون بالا، مصرف کمتر هوای فشرده و یکنواختی مطلوب در فرآیند پودر سازی، کاربردهای گسترده‌ای از جمله در توربین‌های گازی صنعتی و بویلرها دارند. اتمایزر مایع هواده‌ی شده<sup>۱</sup>، نوعی اتمایزر دو سیالی اختلاط داخلی است که در آن گاز اتمایزر برای تشکیل مخلوط دوفازی در بالادست روزنه تخلیه به درون مایع تزریق می‌شود [۲]. از مزایای این نوع اتمایزر در کاربردهای توربین گازی می‌توان به کیفیت اتمیزاسیون خوب، حتی در فشار پاشش و دبی هوای پایین، امکان استفاده از مجاری و روزنه‌های بزرگ‌تر و در نتیجه کاهش مشکلات مربوط به گرفتگی آن‌ها، قابلیت اطمینان بالا، تعمیر آسان و قیمت پایین آن به دلیل سادگی دستگاه اشاره کرد [۳]. رژیم جریان دوفازی درون محفظه اختلاط و مجرای تخلیه اتمایزر مایع هواده‌ی شده متناسب با افزایش نسبت دبی جرمی گاز به مایع<sup>۲</sup> به ترتیب از رژیم جریان حبایی به لخته‌ای<sup>۳</sup> و سپس به حلقوی انتقال می‌یابد [۴-۶]. اسپری حاصل از رژیم جریان حلقوی، به دلیل دارا بودن قطرات ریزتر و پایداری<sup>۴</sup> [۷]، برای کاربردهای پاشش سوخت مناسب‌تر است. در رژیم

جریان حلقوی، شکست ورقه حلقوی مایع خروجی از اتمایزر مسئول تشکیل اسپری و تعیین مشخصه‌های اسپری حاصل است (شکل ۱).



شکل ۱: شکست ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هواده‌ی شده

اتمیزاسیون مایع فرآیند بسیار پیچیده‌ای شامل شکست اولیه، شکست ثانویه و برهم‌کنش بین قطرات است. در شکست اولیه، جت‌ها یا ورقه‌های مایع به لیگامنت‌های ناپایدار و سپس به قطرات فرومی‌پاشند. شکست جت‌ها یا ورقه‌های مایع تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط جریان، خواص سیال و جزئیات هندسه نازل قرار می‌گیرد. نیروهای مختلفی مانند نیروی اینرسی، کشش سطحی، نیروی آیرودینامیکی، نیروی لزجت در این فرآیند درگیرند. بعضی از این نیروها در برابر فرآیند فروپاشی مقاومت کرده در حالی که بعضی دیگر باعث تقویت آن می‌شوند. رقابت بین این نیروها تعیین‌کننده پایداری ورقه یا جت مایع خواهد بود. درک مکانیزم فرآیند شکست نه تنها برای طراحی انژکتور سوخت بلکه برای شبیه‌سازی عددی موتورهای احتراقی نیز مفید خواهد بود. در تحلیل پایداری ورقه حلقوی مایع، نوع تحلیل پایداری و همین‌طور نوع مدهای اغتشاشی مورد مطالعه اهمیت دارند. هر یک از مطالعات انجام‌شده در این زمینه، از یک نوع تحلیل مشخص برای مدهای اغتشاشی معینی در ترکیبی از شرایط جریانی و هندسی تعریف‌شده استفاده کرده‌اند.

در ورقه حلقوی مایع مدهای اغتشاشی سطحی مستقل نمی‌توانند دقیقاً هم‌فاز یا در فاز مخالف هم باشند، یعنی اختلاف فاز صفر یا  $۱۸۰$  درجه فقط تقریبی برای ورقه‌های حلقوی بسیار نازک است. به همین دلیل است که به مدهای اغتشاشی ورقه حلقوی مایع به جای مدهای سینوسی (نامتقارن) و اتساعی<sup>۴</sup> (متقارن)، شبه‌سینوسی و شبه‌اتساعی گفته می‌شود (شکل ۲).

بر اساس مطالعه دو و لی [۸]، در اتمیزاسیون هوا-وزش و هوا-کمک<sup>۵</sup> کاربردی، مد غالب بر فرآیند ناپایداری و شکست ورقه حلقوی مایع، تحت تأثیر چرخش گاز داخل و خارج ورقه، مد شبه‌سینوسی است. هیرو و همکاران [۹]، به کمک تحلیل پایداری زمانی، اتمیزاسیون ورقه حلقوی چرخان لزج مایع خارج‌شونده از اتمایزر هوا-وزش به جریان‌های هوای غیرلزج چرخان داخل و خارج ورقه را مدلسازی کردند. هم‌چنین طول شکست اولیه سیال خروجی از اتمایزر هوا-وزش نیز توسط موسوی و امی [۱۰] با استفاده از تحلیل غیرخطی اغتشاشات کوچک بدست آمده است.

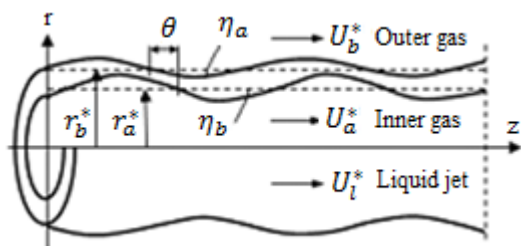
<sup>4</sup> Varicous  
<sup>5</sup> Air-assist

<sup>1</sup> Effervescent atomizer  
<sup>2</sup> Gas-Liquid ratio (GLR)  
<sup>3</sup> Slug

شبه‌اتساعی حل شده و نتایج آن ارائه می‌شود. هم‌چنین اثر لزجت ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی شده بر روی ناپایداری آن در همین نسبت‌های هوادهی بررسی شده و نتایج تحلیل به صورت نمودارهای نرخ رشد اغتشاشات بر حسب عدد موج آن‌ها ارائه شده است.

### معادله پراکندگی حاکم

تحلیل ناپایداری در واقع روشی برای بدست آوردن رابطه پراکندگی بین نرخ رشد موج سطحی و عدد موج است. در شکل ۳ جت حلقوی مایع که در اثر خارج شدن از نازل حلقوی به درون جریان‌های گازی با سرعت‌های متفاوت تشکیل می‌شود، نشان داده شده است. جت حلقوی مایع تشکیل شده تحت تأثیر کشش سطحی و اختلاف فشار دو طرفش قرار می‌گیرد. مطالعه ناپایداری خطی برای جت مایع با فرض اغتشاشات سه بعدی کوچک در دو سطح مشترک (یک سطح مشترک مایع و گاز اتمایزر و دیگری سطح مشترک مایع و گاز محفظه) بر اساس تئوری اغتشاشات کوچک انجام می‌شود.

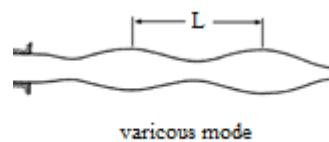


شکل ۳: جت حلقوی مایع خارج شونده به جریان‌های گازی درونی و بیرونی

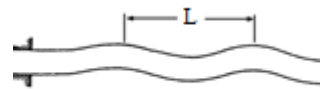
بر اساس تئوری اغتشاشات کوچک فرض می‌شود که جریان ورقه حلقوی مایع و دو جریان گازی درون و بیرون آن توسط اغتشاشات کوچکی مغشوش می‌شوند. برای ساده‌سازی مسئله، بدون از دست دادن ویژگی‌های اصلی جریان، فرضیات زیر صورت می‌گیرد:

۱. چون سرعت‌های جت مایع و محیط گازی در مقایسه با سرعت صوت کوچک هستند، فرض می‌شود که هر دو تراکم‌ناپذیرند.
۲. گاز اطراف غیرلزج ولی ورقه مایع لزج با لزجت  $\mu_l$  است.
۳. فرض می‌شود خواص سیال مانند چگالی مایع  $\rho_l$  و گاز  $\rho_g$  و کشش سطحی  $\sigma$  ثابت هستند.
۴. جریان‌های گاز و مایع هم‌دما هستند.
۵. از اثر گرانش صرف‌نظر می‌شود.
۶. جریان‌های اصلی مایع و گاز به صورت نیمه بی‌نهایت طولانی و متقارن با سرعت‌های یکنواخت متفاوت  $U_l^*$ ،  $U_a^*$  و  $U_b^*$  در جهت محوری و به ترتیب برای مایع، گاز درونی و گاز بیرونی هستند.
۷. فرض می‌شود موج اغتشاشی در جهت محوری و محیطی منتشر می‌شود.

سپس معادلات سه بعدی اغتشاشی حاکم بر جریان لزج ورقه حلقوی مایع و دو جریان غیرلزج گازی درون و بیرون آن استخراج و خطی‌سازی می‌شوند. در نهایت با حل این معادلات اغتشاشی به همراه شرایط مرزی آن‌ها، معادله پراکندگی بدست آورده می‌شود. شرایط مرزی حاکم بر این معادلات شامل شرایط سینماتیکی و دینامیکی است. شرایط مرزی سینماتیکی ناشی از مادی بودن سطوح مشترک در  $r = r_a^*$  و  $r = r_b^*$  است. شرط دینامیکی نیز اشاره می‌کند که به دلیل فرض غیرلزج برای فاز گازی، تنش برشی در

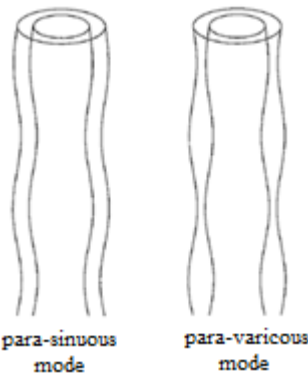


varicous mode



sinuous mode

(الف)



para-sinuous mode

para-varicous mode

(ب)

شکل ۲: مدهای اغتشاشی (الف) ورقه مسطح مایع و (ب) ورقه حلقوی مایع

بعضی از مطالعات انجام شده در زمینه پایداری ورقه حلقوی مایع به بررسی تأثیر لزجت مایع بر پایداری ورقه در شرایط جریان‌های مختلف ورقه مایع و گازهای داخل و خارج آن پرداخته‌اند. از آن جمله، شن و لی [۱۱] با استفاده از تحلیل ناپایداری زمانی جت حلقوی مایع، در حالتی که جت مایع و گازهای داخل و خارج آن دارای سرعت محوری و بدون چرخش هستند، دریافته‌اند که لزجت مایع اثر دوگانه پیچیده‌ای روی ناپایداری ورقه مایع دارد. آن‌ها بیان کردند که لزجت مایع در اعداد وبر بالا باعث پایداری و در اعداد وبر پایین باعث ناپایداری ورقه مایع می‌شود. یان و همکاران [۱۲] اثرات انحنای ورقه، قدرت چرخش مایع و لزجت مایع را با استفاده از تحلیل ناپایداری خطی مکانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها ضمن اینکه نشان‌دهنده غالب بودن مد شبه‌سینوسی برای ورقه حلقوی مایع لزج در حال چرخش در محدوده پارامتری مطالعه شده است، نشان می‌دهد که با لزج در نظر گرفتن ورقه مایع، ماکزیمم نرخ رشد اغتشاشات و عدد موج غالب کاهش می‌یابد. علیزاده و همکاران [۱۳] نیز اثر لزجت ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی شده را برای نسبت‌های هوادهی پایین با استفاده از تحلیل پایداری خطی زمانی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در محدوده نسبت‌های هوادهی مورد بررسی می‌توان ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر را مستقل از لزجت در نظر گرفته و از تحلیل پایداری غیرلزج استفاده کرد.

در مقاله حاضر، هدف مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی شده در نسبت‌های هوادهی بالا است. برای این منظور معادله پراکندگی<sup>۱</sup> بدست آمده از تحلیل پایداری خطی سه بعدی ورقه حلقوی مایع لزج با در نظر گرفتن جریان‌های گازی درون و بیرون ورقه حلقوی برای شرایط جریان‌های ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر شبیه‌سازی شده توسط علیزاده کاکلر و انصاری [۱۴ و ۱۵] در نسبت‌های هوادهی ۱/۲۴٪ و ۱/۸۴٪ برای مدهای اغتشاشی شبه‌سینوسی و

<sup>۱</sup> Dispersion relation

در مطالعه حاضر به منظور صحت سنجی معادله پراکندگی بدست آمده و حل آن، با توجه به این که ورقه مایع و گازهای درون و بیرون آن دارای چرخش نمی‌باشند، معادله (۱) با شرایط جریانی مشابه کار لیائو و همکاران [۱۶] و در حالت بدون چرخش هوا، حل و با نتایج آن‌ها مقایسه شده است. نمودار شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از کار حاضر، برای تغییرات نرخ رشد اغتشاشات بر حسب عدد موج، در اعداد رینولدز مختلف را با نتایج لیائو و همکاران نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از حل معادله پراکندگی بدست آمده در هر دو مطالعه به خوبی منطبق بر یکدیگر هستند. بنابراین با اطمینان از معادله پراکندگی بدست آمده و حل آن، به مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع برای شرایط تقریبی جریانی و هندسی متمایز مایع هوادهی شده مورد مطالعه توسط عزیزاده کاکلر و انصاری [۱۴] در نسبت‌های هوادهی بالا پرداخته شده است.

### بررسی ناپایداری مدهای اغتشاشی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی سه بعدی جریان دو فازی داخل متمایز مایع هوادهی شده [۱۵]، ضخامت و سرعت تقریبی ورقه حلقوی مایع خروجی از متمایز و سرعت خروجی گاز داخل آن در نسبت‌های هوادهی ۱/۲۴ و ۱/۸۴ به صورت جدول ۱ خلاصه شده است. با توجه به اینکه ورقه حلقوی مایع وارد جریان گازی ساکن می‌شود، سرعت گاز بیرونی ورقه حلقوی برابر صفر خواهد بود.

جدول ۱: شرایط خروجی جریان در نسبت‌های هوادهی مختلف برای متمایز مایع هوادهی شده شبیه‌سازی شده توسط عزیزاده کاکلر و انصاری [۱۵]

GLR%	ضخامت ورقه مایع (mm)	سرعت ورقه مایع (m/s)	سرعت هسته گازی (m/s)
۱/۲۴	۰/۱۷	۷/۱۶	۳۰/۷۲
۱/۸۴	۰/۱۴	۹/۳۸	۴۲/۷۵

با استفاده از شرایط خروجی جریان در متمایز مایع هوادهی شده که در واقع شرایط ورودی برای تحلیل پایداری ورقه حلقوی مایع محسوب می‌شود، اعداد بدون بعد لازم برای حل معادله پراکندگی به صورت جدول ۲ بدست آمده است.

جدول ۲: اعداد بدون بعد لازم در حل معادله پراکندگی برای نسبت‌های هوادهی مختلف [۱۵]

GLR	Re	We <sub>l</sub>	We <sub>a</sub>	We <sub>g</sub>	$\bar{r}_a^*$	$\gamma$
۰/۳۲	۳۵۳۰	۱۷۳	۱/۲۸	۰	۰/۷۷	۰/۰۰۱۱۴
۰/۶۲	۳۶۶۵	۱۸۷	۳/۰۵	۰	۰/۸۱	۰/۰۰۱۱۴

با استفاده از داده‌های جدول ۲، معادله پراکندگی برای بدست آوردن بیشینه نرخ رشد امواج اغتشاشی در طول موج‌های مختلف حل شده است. نتایج حل نشان داد که مد اغتشاشی متقارن محوری ( $n=0$ ) تنها مد ناپایدار بوده و در مدهای اغتشاشی نامتقارن محوری ( $n=1,2,3,\dots$ )، معادله پراکندگی فاقد ریشه مختلط با قسمت موهومی مثبت است. با توجه به نتیجه مشابه بدست آمده توسط عزیزاده و همکاران [۱۷]، برای نسبت‌های هوادهی پایین، می‌توان نتیجه گرفت که برای ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از متمایز مایع هوادهی شده به جای تحلیل پایداری خطی سه بعدی می‌توان از تحلیل پایداری خطی دو بعدی استفاده کرد.

این سطوح مشترک باید به صفر برسد و تنش‌های نرمال در عرض آن‌ها با توجه به اثر کشش سطحی  $\sigma$ ، باید پیوسته باشند. به علاوه، در فاز گازی محفظه، اثرات اغتشاشات، چه در خط مرکزی و چه در دور از جت مایع، باید به لحاظ فیزیکی محدود باقی بماند. بدین ترتیب معادله پراکندگی حاکم بر ورقه حلقوی مایع به صورت زیر بدست می‌آید:

$$l_{94}\omega^4 + l_{93}\omega^3 + l_{92}\omega^2 + l_{91}\omega = 0 \quad (1)$$

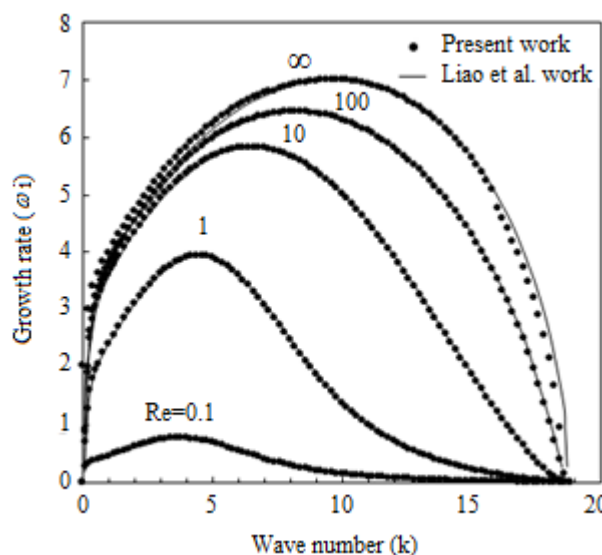
ضرایب  $l_{91}$  تا  $l_{94}$  که در پیوست ۱ مرجع [۱۵] آورده شده است دارای توابع بسط اصلاح شده نوع اول و دوم  $Sr$  هستند.  $S$  از طریق رابطه  $S^2 = i\text{Re}(k\bar{U}_i^* - \omega) + k^2$  به فرکانس بدون بعد موج اغتشاشی  $\omega$  مربوط می‌شود. بنابراین معادله (۱) یک معادله غیرخطی مرتبه چهارم بر حسب  $\omega$  بوده و دارای چهار ریشه مختلط است.

### ارائه نتایج

اگر فرکانس بدون بعد موج اغتشاشی  $\omega$  به صورت مختلط  $\omega = \omega_r + i\omega_i$  نوشته شود، قسمت موهومی  $\omega_i$  نرخ رشد یا اضمحلال اغتشاش با زمان را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه شکست مایع در طول موج با بیشترین نرخ رشد اتفاق می‌افتد بنابراین هدف از حل معادله پراکندگی پیدا کردن ریشه مختلط با بزرگترین قسمت موهومی مثبت خواهد بود. برای بدست آوردن ریشه‌های معادله (۱) از روش ریشه‌یابی مولر<sup>۱</sup> استفاده شده است. مراحل حل معادله به کمک روش مولر نیز در نرم‌افزار متمتیکا<sup>۲</sup> کدنویسی شده است.

### بررسی صحت معادله پراکندگی بدست آمده و حل آن

تاکنون مطالعات تحلیلی زیادی بر روی پایداری ورقه حلقوی مایع انجام شده است. از آن میان، لیائو و همکاران [۱۶] برای مدل کردن ورقه حلقوی مایع در پایین دست متمایز هوا-وزش از تحلیل پایداری سه بعدی لزج استفاده کردند. آن‌ها اثرات سرعت محوری، چرخش هوا و لزجت مایع روی نرخ رشد مدهای اغتشاشی را به تفصیل بررسی و در غالب نمودارهای پراکندگی ارائه کرده‌اند.

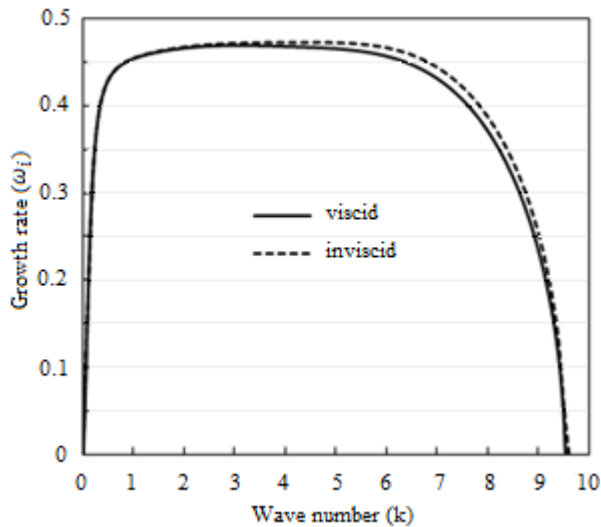


شکل ۴: مقایسه نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر برای حل معادله پراکندگی بر حسب تغییرات نرخ رشد اغتشاشات با عدد موج با نتایج بدست آمده توسط لیائو و همکاران [۱۶]  $We_l = 37, We_a = 18, We_g = 20, \gamma = 1.29 \times 10^{-3}, \bar{r}_a^* = 0.9$ ،  $n=0$ .

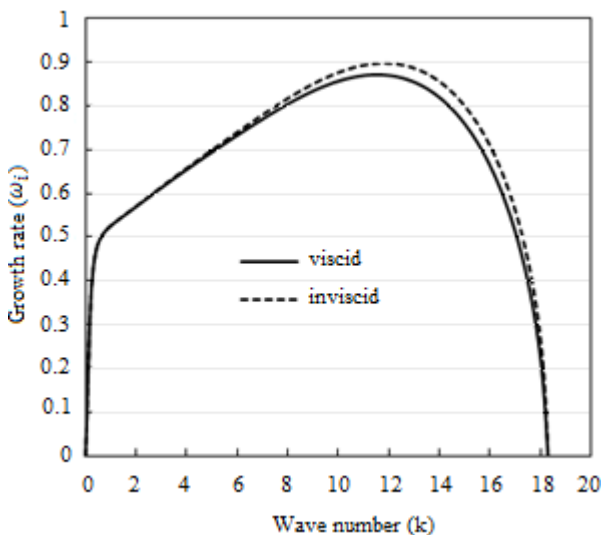
<sup>2</sup> Mathematica

<sup>1</sup> Muller method

ناپایداری مدهای اغتشاشی متقارن محوری شبه‌سینوسی بررسی شده است. به این منظور نمودار تغییرات نرخ رشد اغتشاشات متقارن محوری شبه‌سینوسی با عدد موج آن‌ها یک بار با فرض مایع لزج و بار دیگر با غیرلزج فرض کردن مایع ( $Re \rightarrow \infty$ ) رسم و با هم مقایسه شده‌اند (شکل ۶).



(الف)

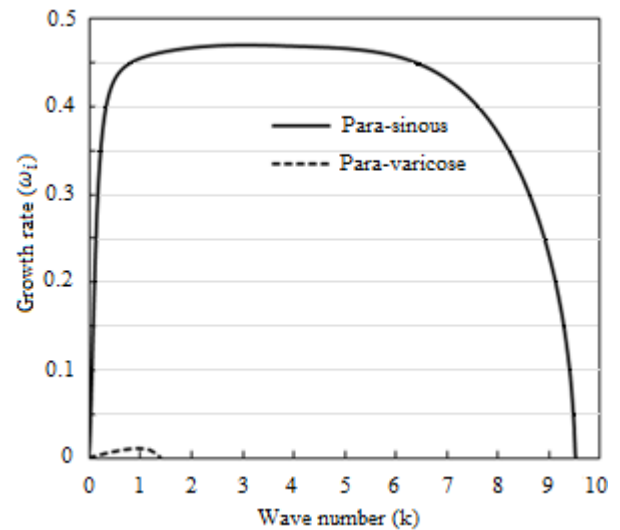


(ب)

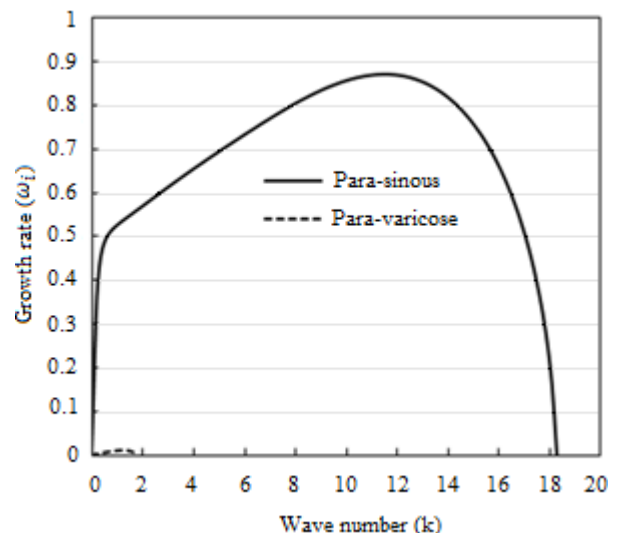
شکل ۶: تغییرات نرخ رشد مدهای اغتشاشی متقارن محوری شبه‌سینوسی لزج و غیرلزج با عدد موج آن‌ها برای (الف)  $GLR=1.24\%$  و (ب)  $GLR=1.84\%$ .

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، با لزج فرض کردن ورقه حلقوی مایع، ضمن ثابت ماندن محدوده اعداد موج ناپایدار، بیشینه نرخ رشد اغتشاشات در هر دو نسبت هوادهی کمی کاهش یافته است. یعنی لزجت مایع تا حدی اثر پایدارکنندگی روی ورقه حلقوی مایع داشته است. علیزاده و همکاران [۱۳]، در مطالعه اثر لزجت و ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی‌شده در نسبت‌های هوادهی پایین، به این نتیجه رسیدند که لزجت مایع هیچ تأثیر قابل توجهی بر روی ناپایداری آن نداشته و دو نمودار لزج و غیرلزج تقریباً برهم منطبق‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثر لزجت مایع روی ناپایداری ورقه حلقوی خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی‌شده، با افزایش نسبت هوادهی اهمیت می‌یابد. به عبارت دیگر، صرف نظر کردن از لزجت مایع در نسبت‌های هوادهی بالا می‌تواند باعث ایجاد خطا در محاسبات مربوط به پایداری ورقه حلقوی و طول شکست مربوط به آن شود.

نتایج حل مربوط به مد اغتشاشی متقارن محوری برای هر دو مد اغتشاشی شبه‌سینوسی و شبه‌اتساعی در نسبت‌های هوادهی  $1/24\%$  و  $1/84\%$  به صورت نمودارهای پراکندگی در شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵: تغییرات نرخ رشد مدهای اغتشاشی شبه‌سینوسی و شبه‌اتساعی با عدد موج آن‌ها برای (الف)  $n=0$  و  $GLR=1.24\%$  و (ب)  $n=0$  و  $GLR=1.84\%$ .

با توجه به شکل ۵، در نسبت‌های هوادهی مورد بررسی، نرخ رشد مد شبه‌سینوسی بسیار بیشتر از نرخ رشد مد شبه‌اتساعی است. یعنی اغتشاشات شبه‌سینوسی بسیار ناپایدارتر از اغتشاشات شبه‌اتساعی هستند. بنابراین در نسبت‌های هوادهی بالا هم، مانند نسبت‌های هوادهی پایین بررسی شده توسط علیزاده و همکاران [۱۷]، مد غالب در شکست ورقه حلقوی مایع مد اغتشاشی شبه‌سینوسی است. هم‌چنین همان‌طور که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت هوادهی، علاوه بر افزایش دامنه اعداد موج ناپایدار مربوط به مد غالب شبه‌سینوسی، عدد موج مربوط به بیشترین نرخ رشد اغتشاشات نیز به سمت اعداد موج بزرگ‌تر انتقال یافته است. به بیان دیگر با افزایش نسبت هوادهی، شکست ورقه حلقوی مایع در طول موج‌های کوتاه‌تری اتفاق خواهد افتاد.

#### بررسی اثر لزجت در ناپایداری ورقه حلقوی مایع

برای بررسی اثر لزجت در ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هوادهی‌شده، با توجه به نتایج بیان شده در بخش‌های قبلی، تنها

- 1- Bai, P.B., Xing, Y.M., and Wang, Z., 2014, "Experiment Study and Simulation Research for the Atomization Characteristics of the Internal-Mixing Twin-Fluid Atomizer", in *Advanced Materials Research*, 1049, 1075-1082.
- 2- Sovani, S. D., Sojka, P. E., Lefebvre, A. H., 2001, "Effervescent Atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 (4), 483-521.
- 3- Lefebvre, H., and Ballal, R., 2010, "GAS Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions", Third Edition, CRC press.
- 4- Sarkar, U., Ramamurthi, K., 2007, "Flow visualization of sprays formed by bubbly, slug, and annular flows in an effervescent atomizer", *Journal of Flow Visualization & Image Processing*, 14 (4), 397-408.
- 5- Lörcher, M., Schmidt, F., Mewes, D., 2005, "Effervescent atomization of liquids", *Atomization and Sprays*, 15 (2), 145-168.
- 6- Kim, J. Y., Lee, S. Y., 2001, "Dependence of spraying performance on the internal flow pattern in effervescent atomizers", *Atomization and Sprays*, 11 (6), 735-756.
- 7- Jedelsky, J., Jicha, M., 2008, "Unsteadiness in effervescent sprays: a new evolution method and influence of operational conditions", *Atomization and Sprays*, 18 (1), 49-83.
- 8- Du, Q., Li, X., 2005, "Effect of gas stream swirls on the instability of viscous annular liquid jets", *Acta Mechanica*, 176 (1-2), 61-81.
- 9- Herrero, E. P., Del Valle, E. M., Galan, M. A., 2007, "Instability study of a swirling annular liquid sheet of polymer produced by air-blast atomization", *Chemical Engineering Journal*, 133 (1-3), 69-77.

۱۰- موسوی، سید حسین، امی، فتح‌الله، ۱۳۹۳. "تعیین مشخصات شکست اولیه صفحه سیال خروجی از اتمایزر ایربلست به وسیله بررسی غیرخطی ناپایداری در صفحه سیال"، *مجله مکانیک سیالات و آیرودینامیک*، سال سوم شماره ۲، صفحه ۱۱.

- 11- Shen, J., Li, X., 1996, "Instability of an annular viscosity liquid jet", *Acta Mechanica*, 114 (12), 167-183.
- 12- Yan, K., Ning, Z., Lü, M., Sun, C., Fu, J., Li, Y., 2015, "Spatial instability in annular swirling viscous liquid sheet", *Physics of Fluids*, 27 (2), 024101.

۱۳- علیزاده کاکلر، زهرا، انصاری، محمدرضا، علیزاده کاکلر، جواد، ۱۴۰۰. "بررسی اثر لزجت در ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج شونده از اتمایزر مایع هواده‌شده"، *بیست و نهمین همایش سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه های حرارتی*.

۱۴- علیزاده کاکلر، زهرا، انصاری، محمدرضا، ۱۳۹۹. "مطالعه عددی جریان سه‌بعدی داخل مجرای تخلیه اتمایزر مایع هواده‌شده در نسبت‌های هواده‌ی مختلف"، *سوخت و احتراق*، (۴) ۱۳، ۴۲-۲۵.

۱۵- علیزاده کاکلر، زهرا، انصاری، محمدرضا، ۱۳۹۷. "شبیه‌سازی میدان جریان داخلی یک انژکتور و مطالعه ناپایداری خطی ورقه حلقوی مایع خارج شونده"، *پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران*.

- 16- Liao, Y., Jeng, S., Jog, M. A., Benjamin, M. A., 2000, "Instability of an annular liquid sheet surrounded by swirling airstreams", *AIAA Journal*, 38 (12), 453-460.

۱۷- علیزاده کاکلر، زهرا، انصاری، محمدرضا، علیزاده کاکلر، جواد، ۱۳۹۹. "مطالعه ناپایداری مدهای اغتشاشی ورقه حلقوی مایع خارج شونده از اتمایزر مایع هواده‌ی شده"، *بیست و هشتمین کنفرانس سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران*.

هم‌چنین با دقت در شکل ۶ می‌توان دریافت که با لزج در نظر گرفتن مایع، عدد موج مربوط به بیشینه نرخ رشد اغتشاشات به سمت عدد موج کمتر انتقال می‌یابد. به عبارت دیگر، لزجت مایع باعث شکست ورقه حلقوی مایع در طول موج‌های بلندتر خواهد شد. نتیجه بدست آمده مشابه نتیجه یان و همکاران [۱۲]، در مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع لزج در حال چرخش، است.

### نتیجه‌گیری

مقاله حاضر با استفاده از تحلیل پایداری زمانی خطی، به مطالعه ناپایداری ورقه حلقوی مایع خارج‌شونده از اتمایزر مایع هواده‌ی شده در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع بالا پرداخته است. در تحلیل خطی انجام شده، هم اثر لزجت مایع و هم اثر اغتشاشات سه بعدی در نظر گرفته شده است. با حل معادله پراکندگی بدست آمده برای شرایط جریانی ورقه حلقوی مایع خروجی از اتمایزر مایع هواده‌ی شده در نسبت‌های هواده‌ی ۱/۲۴٪ و ۱/۸۴٪، نمودارهای تغییرات نرخ رشد اغتشاشات بر حسب عدد موج رسم شدند. این نمودارها نشان دادند که در نسبت‌های دبی جرمی گاز به مایع مورد بررسی، مدهای اغتشاشی متقارن محوری شبه‌سینوسی مد غالب در شکست ورقه حلقوی مایع خروجی از این نوع اتمایزر هستند. هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش نسبت هواده‌ی، علاوه بر افزایش دامنه اعداد موج ناپایدار مربوط به مد غالب شبه‌سینوسی، عدد موج مربوط به بیشترین نرخ رشد اغتشاشات نیز به سمت اعداد موج بزرگ‌تر، طول موج‌های کوتاه‌تر، انتقال می‌یابد. با حل غیرلزج معادله پراکندگی، اثر لزجت روی ناپایداری ورقه حلقوی مایع نیز بررسی شد. نتایج این حل نشان دادند که در نسبت‌های هواده‌ی بالا، لزجت مایع تا حدی اثر پایدارکنندگی داشته و باعث شکست ورقه حلقوی مایع در طول موج‌های بلندتر خواهد شد.

### فهرست علائم

$k$	عدد موج محوری بدون بعد
$n$	عدد موج محیطی
$r$	فاصله شعاعی، m
$r_a^*$	شعاع داخلی ورقه حلقوی، m
$\bar{r}_a^*$	شعاع داخلی بدون بعد ورقه حلقوی
$r_b^*$	شعاع خارجی ورقه حلقوی، m
$\bar{r}_b^*$	شعاع خارجی بدون بعد ورقه حلقوی
Re	عدد رینولدز
We	عدد وبر
$U_n^*$	سرعت محوری جریان اصلی فاز n m/s
$\bar{U}_n^*$	سرعت محوری بدون بعد جریان اصلی فاز n

### فهرست علائم یونانی

$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	لزجت دینامیکی، Ns/m <sup>2</sup>
$\sigma$	کشش سطحی، N/m
$\omega$	فرکانس زمانی بدون بعد $\omega = \omega_r + i\omega_i$

### زیرنویس‌ها

$a$	گاز درون ورقه حلقوی مایع
$b$	گاز بیرون ورقه حلقوی مایع
$g$	گاز
$l$	مایع

### مراجع

