

بررسی روش‌های اندازه‌گیری قطرات ریز و درشت در جریان‌های دوفازی توربین‌های بخار

مسعود ضیاء بشرحق^۱، حیدر جعفری‌زاده^۲ و*

^۱استاد گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲دانشجوی مقطع دکتری گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*مسئول مکاتبات: heidar.jafarizadeh@gmail.com

◀ واژگان کلیدی

توربین بخار
جریان دوفازی
روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای قطره
تلفات رطوبت
قطرات درشت
پروب‌های نوری

◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۱۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

◀ چکیده

حضور فاز مایع در توربوماشین‌ها باعث ایجاد افت‌های ترمودینامیکی، تلفات آیرودینامیکی و خسارات مکانیکی می‌شود. محققان مختلفی با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی نسبت به تشخیص پارامترهای مختلفی مانند رشد قطرات، ناپایداری‌های جریان، ابعاد و اندازه‌های قطرات و غیره پرداخته‌اند. در تحقیق حاضر روش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته اخیر و چگونگی توسعه ابزار دقیق اندازه‌گیری مربوطه در تشخیص ابعاد و نحوه حرکت قطرات با توجه به سایز قطره‌های مشاهده شده در فاز مایع مورد بررسی واقع شده است. تلاش‌های محققین مختلف از دهه ۸۰ میلادی تا سال‌های اخیر دو دسته‌بندی عمده قطرات را مبتنی بر نحوه تشکیل و شعاع قطرات موجود در جریان دو فازی و محدودیت‌های تکنیکی در روش‌های اندازه‌گیری بوجود آورده است: ۱- قطرات ریز (قطر ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر) و ۲- قطرات درشت (قطر ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر). هدف اصلی اندازه‌گیری قطرات ریز و درشت به ترتیب بدست آوردن نسبت حجم مایع و کاهش سایش‌های مکانیکی است. اغلب پروب‌های نوری طراحی و ساخته شده دارای قابلیت تشخیص قطراتی با قطر حداکثر ۱۰ میکرومتر بوده و اخیراً روش‌های اندازه‌گیری قطرات درشت آب در حال توسعه است. در مقاله حاضر دانش و تکنولوژی فعلی در روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای مختلف قطره‌های ریز و درشت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۱ مقدمه

در اکثر نیروگاه‌های بخار متعارف، توربین با بخار سوپرهیت تغذیه می‌شود، اما در طی انبساط بخار حالت سیال به ناحیه دو فاز وارد می‌شود و در بخش‌های کم فشار انتهایی (LP) شرایط ترمودینامیکی حالت مرطوب وجود دارد. علاوه بر این شرایط ترمودینامیکی سیال در ورودی توربین نیروگاه‌های هسته‌ای و زمین گرمایی در حال حاضر اغلب مرطوب است و یا در بهترین حالت فقط کمی فوق گرم بوده بطوریکه اثرات رطوبت در کل توربین قابل ملاحظه هستند.

در موارد ذکر شده، حضور فاز مایع باعث بوجود آمدن افت‌های ترمودینامیکی، افت‌های آیرودینامیکی و خسارات مکانیکی شده که به طور کلی به عنوان خسارات یا افت‌های رطوبت شناخته می‌شوند.

تأثیر نامطلوب فاز مایع بر راندمان، قدردان اولین تلاش‌های انجام شده در بررسی توربین‌های بخار توسط K. Baumann است که در سال ۱۹۱۲ قانون یک درصد برای یک درصد خود را منتشر کرد، [۱]. این رابطه همبستگی کاملاً تجربی نشان می‌دهد که هر پیدایش هر ۱٪ از رطوبت موجب کاهش ۱٪ راندمان کل می‌شود. از دیگر پژوهش‌های اولیه مورد اهمیت می‌توان به تحقیقات Gyarmathy [۲] اشاره نمود که در دهه ۱۹۶۰ مدل‌هایی را برای بسیاری از فرآیندهای دوفازی توربین توسعه داد. اندازه‌گیری‌های اپتیکی

انجام شده در طول دهه ۱۹۸۰ [۳] نشان دادند که در توربین‌هایی که وقوع چگالش زودتر صورت می‌گیرد افت‌ها به مراتب بیشتر از آن چیزی است که Baumann ارائه کرده است. علی‌رغم این پیشرفت‌ها، نظریه‌های بخار مرطوب هنوز به طور کامل در روش‌های طراحی توربین استفاده نمی‌شود و همچنان قانون اصلاح شده Baumann در طراحی‌ها به عنوان معیار طراحی پذیرفته شده است [۴].

محققین و پژوهشگران متعددی تکنیک‌های مختلف اندازه‌گیری پارامترهای مختلفی مانند توزیع و سرعت حرکت قطرات ریز و درشت^۱ در فاز مایع و سرعت و فشار بخار را توسعه داده‌اند. علاوه بر این، تدقیق در اندازه‌گیری نسبت جرمی رطوبت برای تعیین عملکرد توربین و آگاهی از توزیع اندازه قطرات (به ویژه قطرات درشت) برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌های سایشی و محاسبه برخی از افت‌های ناشی از رطوبت همچنان مورد نیاز است. برای اندازه‌گیری‌های آیرودینامیکی، در نظر گرفتن تعامل بین بخار و قطرات و ابزارهای اندازه‌گیری خاص باید توسعه یافته و ناپایداری‌های جریان تعیین شوند. در تحقیق حاضر آخرین پژوهش‌های انجام شده برای تعیین پارامترهای قطرات ریز و درشت در کنار کارهای ارزشمند قدیمی بررسی شده و ابزار اندازه‌گیری قطرات با تمرکز بر کاربرد آن‌ها در نیروگاه‌های فسیلی مورد مطالعه قرار گرفته است.

^۱Fine and coarse droplets

۲ اندازه‌گیری قطرات

تقریب سمت راست با توجه به اینکه غلظت مایع به مراتب از ۱ کوچکتر است بدست می‌آید. با توجه عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت قطرات درشت آب با استفاده از روش‌های نوری [۳، ۶، ۷]، والترز و همکاران [۳] رطوبت واقعی کل را با استفاده از رابطه اصلاح شده زیر به میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از تکنیک‌های نوری ارتباط دادند:

$$y = y_{\text{optical}} + y_{\text{water coarse}} \approx 1/8 y_{\text{optical}}$$

علاوه بر این در [۶]، Williams و Lord نواقص اندازه‌گیری نوری را با اندازه‌گیری مایع خروجی از توربین محاسبه کرده و قطرات درشت را حدود ۵/۱ تا ۷/۶ درصد از کل رطوبت ایجاد شده تخمین زدند. به این ترتیب اولین گام‌های تحقیقاتی در تعیین حجم نسبت رطوبت برداشته شد.

تکنیک‌های اندازه‌گیری اپتیکی رطوبت را می‌توان به روش‌های میرایی نور^۵ و پراکندگی نور^۶ تقسیم کرد. هر دو بر اساس نظریه پراکندگی Mie مشتق شده از معادلات ماکسول در الکترومغناطیس بنا شده‌اند. روش‌های مبتنی بر میرایی بر پایه ضعیف شدن پرتو نور به دلیل رخدادهای مختلف انعکاس و جذب توسط تعداد زیادی از قطرات است و بنابراین برای مه‌های غلیظ مناسب هستند [۳]. در مقابل، روش‌های پراکندگی بر روی شکست و انعکاس نور ناشی از برخورد با یکایک قطرات تکیه دارند و به همین دلیل عمدتاً برای جریان‌های با تعداد کم قطره کاربرد دارد، [۸].

با توجه به اینکه چگالش خود به خودی در بخش LP^۷ توربین بخار، قطرات بسیار ریزی را با قطر حدود ۵/۵ تا ۵ میکرومتر در قالب مه غلیظ تولید می‌کند، استفاده از میرایی نور روشی مناسب برای اندازه‌گیری این نوع قطرات است که در مراجع مختلفی از جمله [۹] از آن استفاده شده است.

با توجه به اینکه قطرات معمول، طول موج‌های نوری اتساع شده بین ۳۵۰ - ۱۲۰۰ نانومتر را بسیار کم جذب می‌نمایند میرایی پرتو نور بیشتر از نوع پراکندگی خواهد بود، [۱۰]. شدت یک پرتو نور برخوردی تک رنگ از طول موج λ که فاصله L را در میان مه طی می‌نماید، به صورت رابطه زیر و با نرخ نمای مستهلک می‌شود:

$$I = I_0 \exp(-gL)$$

که I_0 شدت اولیه است و g کدورت است که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$g = \int_0^{\infty} E(\alpha_M) \frac{\pi D^2}{4} N(D) dD$$

در این عبارت E ضریب انقراض Mie است که به پارامتر اندازه ذرات $\alpha_M = \pi D/\lambda$ بستگی دارد. ترکیب دو معادله فوق مقیاس نهایی میرایی (یا قانون Beer-Lambert) را ارائه می‌کند:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = L \int_0^{\infty} E(\alpha_M) \frac{\pi D^2}{4} N(D) dD$$

با توجه به چند پخشی موجود^۸ در توزیع شعاع قطرات، اندازه‌گیری‌ها

علاوه بر توربو ماشین‌ها، تکنیک‌های نوری^۱ به طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری قطرات و ذرات در بسیاری از زمینه‌های علمی استفاده می‌شود [۵]. در اولین مطالعات انجام شده (در دهه ۸۰ میلادی) محققان به منظور بهبود مدل‌های آب و هوایی، جهت اندازه‌گیری اندازه قطرات در محدوده قطر ۰/۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر و غلظت قطره تا ۵۰۰ بر سانتی متر مکعب از پروب‌های نوری^۲ نصب شده روی بدنه هواپیماها پرداختند. این پروب‌ها با استفاده از تکنیک‌های پراکندگی نور و تکنیک‌های تصویربرداری، قطرات مزبور را اندازه‌گیری می‌کنند. با توجه اندازه‌های بزرگ (قطر غلاف خارجی حدود ۳۰۰ میلی‌متر) و طراحی خاص آن‌ها، قابل استفاده در صنعت توربو ماشین‌های نبودند.

اندازه‌گیری توزیع و اندازه قطرات جریان‌های دو فاز در علوم مختلفی مانند احتراق، فیزیک پلاسما، گرد و غبار و علوم پزشکی مورد علاقه بسیاری بوده و ابزارهای مختلف توسعه داده شده در این صنایع، هرگز در ابعاد و اندازه‌های کوچک مورد نیاز صنعت توربو ماشین نبوده است.

با توجه به سبب قطرات موجود در فاز مایع توربین‌های بخار، تکنولوژی و محدودیت ساخت و توسعه پروب‌ها، ابزار دقیق مناسب برای اندازه‌گیری پارامترهای قطره، به دو بخش اندازه‌گیری قطرات ریز (قطر ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر) و قطرات درشت (قطر ۱۰ تا ۵۰۰ میکرومتر) قابل تقسیم است.

۱.۲ اندازه‌گیری قطرات ریز

با توجه به اینکه حجم اصلی مایع ایجاد شده در جریان دوفازی توربو ماشین‌ها را قطرات ریز تشکیل می‌دهند [۳، ۶]، هدف اصلی اندازه‌گیری قطرات ریز بدست آوردن نسبت حجم مایع به کل مخلوط است. برای چنین اندازه‌گیری‌هایی معمولاً با ترم غلظت (به عنوان مثال، تعداد قطرات در واحد حجم) سروکار خواهیم داشت. بنابراین، غلظت کل حجم مایع به وسیله رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_l = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{\pi}{6} D^3 N(D) dD$$

جایی که D_{\min} و D_{\max} کوچکترین و بزرگترین قطر قطرات (به طور معمول ۰/۵ و ۱۰ میکرون) است و $N(D)$ مانند $f(r)$ تعریف می‌شود^۳ اما در واحد حجم نسبت به واحد جرم است. همانطور که اشاره شد در توربین‌های LP، بیشتر جرم مایع از قطرات مه می‌آید، بنابراین برای نسبت رطوبت کل داریم:

$$y = \frac{\rho_l C_l}{\rho_l C_l + (\lambda - C_l) \rho_g} \approx \frac{C_l}{C_l + \rho_g/\rho_l}$$

^۴ N^* در واحد حجم و f در واحد جرم تعریف می‌شود.

^۱Optical technics

^۲Optical Probes

^۳continuous droplet-number density function

^۵Light-Extinction

^۶Light-Scattering

^۷Low Pressure

^۸Polydispersion

نشان می‌دهد که به مانند نتایج [۱۱] برخلاف فشار سکون ثابت در سطح مقطع عرضی توربین، نسبت رطوبت متغیر است. اما متوسط Sauter^۶ قطرات در محدوده کوچک ۰/۲ تا ۰/۶ میکرومتر باقی می‌ماند.

۲.۲ اندازه‌گیری قطرات درشت

تاکنون اغلب پروب‌های طراحی و ساخته شده برای اندازه‌گیری سایز قطرات دارای حداقل قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر با قابلیت تشخیص قطراتی با قطر حداکثر ۱۰ میکرومتر می‌باشند. همانطور که اشاره شد، ابزارهای اندازه‌گیری فوق‌الذکر فقط قابلیت تعیین نسبت رطوبت کل و تشخیص قطره‌های مه‌گونه را دارند و به این ترتیب پدید سایش مکانیکی ناشی از تصادم قطرات درشت با این ابزار قابل مطالعه نمی‌باشد.

تفطیر در بخش LP توربین‌های بخار عمدتاً بوسیله‌ی جوانه زایی خود به خود در فاز بخار اتفاق می‌افتد و در مرحله اول یک مه غلیظ از قطرات بسیار ریز ایجاد می‌کند. قطرات، اگرچه کوچک هستند، جریان اصلی را دنبال کرده و بخش کوچکی از آن‌ها به وسیله مکانیزم‌های پخش و اینرسی^۸ روی تیغه‌ها را به صورت فیلمی از آب می‌پوشانند. این فیلم توسط درگ جریان اصلی به سمت لبه‌های انتهایی هدایت شده و به شکل قطرات درشتی با ابعاد ۱۰ - ۵۰ میکرومتر وارد جریان اصلی می‌شوند [۱۲].

یانگ و همکاران [۱۲] جریان‌های مایع با قطرات درشت آب را در بالا و پایین دست مرحله آخر دو توربین بخار ۵۰۰ مگاواتی با استفاده از پروب جاذب آب^۹ اندازه‌گیری کردند. عملیات این پروب شامل قرار دادن یک نمونه استوانه‌ای از یک کاغذ جاذب رول شده در جریان بخار مرطوب در یک زمان مشخص است. پس از کم کردن تصحیح ناشی از حضور قطره‌های مه (با استفاده از روش‌های نوری میراشونده اندازه‌گیری می‌شود)، افزایش وزن نمونه با دبی جرمی موضعی قطرات درشت ارتباط مستقیم دارد. نتایج آزمایشات نشان داد که نسبت جریان آب ناشی از قطرات درشت به کل جریان در هر دو مرحله بالا و پایین دست مرحله نهایی توربین حدود ۲ - ۴ درصد است. این به خوبی با برآوردهای نظری مرحله تشکیل قطره ۲ - ۳ درصد همخوانی دارد، [۱۲].

بسیاری از روش‌های مختلف نوری برای اندازه‌گیری توزیع مقادیر آب توسط پژوهشگران مختلف جمع‌آوری شده است. به عنوان نمونه، Kleitz و Dorey [۱۳] کارهای انجام شده تا سال ۲۰۰۴ را که شامل تکنیک‌های تصویربرداری بر اساس Shadowgraphy، Holography، Particle-Sizing interferometry، defractometry و شمارنده‌های اپتیکی مبتنی پراکندگی نور را طبقه بندی و خلاصه کرده‌اند. جزئیات این روش‌ها در اینجا آورده نمی‌شوند و تمرکز مقاله حاضر بر روی تحولات سال ۲۰۱۴ به بعد است.

Vernon و همکاران [۱۴]، پروب عکاسی اپتیکی^{۱۰} را با استفاده از

باید در تعداد مختلفی طول موج انجام شود، به این ترتیب توزیع تراکم تعداد قطرات $N(D)$ از معادله فوق با حل ماتریس معکوس تعیین می‌شود، [۳]. از کارهای اخیر انجام شده در توسعه روش‌های نوری می‌توان به والترز و همکاران [۳] در توسعه یک پروب میرایی شونده^۱ با استفاده از منبع نوری قوس زنون اشاره نمود. در این آزمایش از پروب با قطر ۲۵/۴ میلی‌متر استفاده شده است. پروب مذکور با استفاده از فیلترهای نوری قابلیت تولید نور تک طول موج را در بازه ۳۰۰ - ۱۰۵۰ داراست (پروب میرایی نوری در این نوع عموماً قادر به اندازه‌گیری قطر قطرات در محدوده ۰/۱ تا ۲ میکرومتر با دقت مناسب می‌باشند). در تحقیق مذکور، توزیع رطوبت در بالادست و پایین دست مرحله نهایی چندین توربین اندازه‌گیری شده و به این ترتیب میزان کارایی موضعی محاسبه گردید. در بررسی نتایج جریان در خروجی قطرات مه با قطر ۰/۲ تا ۰/۶ میکرومتر مشاهده شده است.

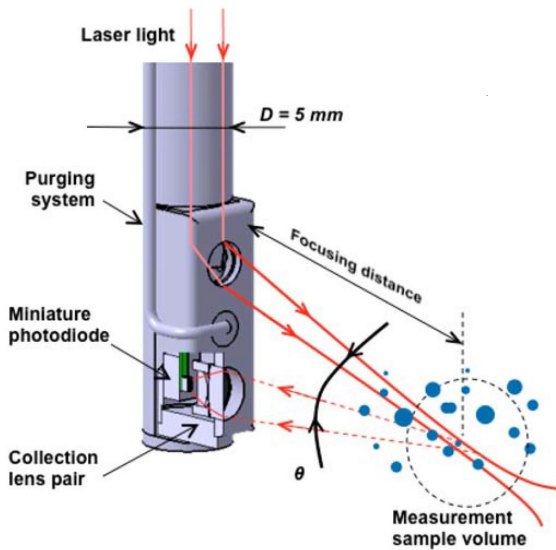
Nagao و Tatsano [۸] یک پروب فیبر نوری را برای اندازه‌گیری قطرات مه در یک توربین بخار ۱۰- مگاواتی با استفاده از روش پراکندگی پیش‌رو^۲ توسعه دادند. قطر نوک پروب ۲۰ میلی‌متر بود و قطر قطره قابل تشخیص از ۰/۱ تا ۵ میکرومتر (اندازه متوسط) با دقت $1 \mu m$ بود. آن‌ها قطر قطرات مشاهده شده در خروجی بین ۰/۲ تا ۱/۰ میکرومتر بودند. تفاوت سایز قطرات با توجه به محل نصب پروب بوده و به همین ترتیب نسبت کل رطوبت خروجی (۰/۶٪ تا ۱/۴٪) متغیر بوده است.

اخیراً پروب‌های پنوماتیکی ترکیبی^۳ توسعه یافته و در اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز برای طراحی و بررسی راندمان استفاده شده‌اند. از میان آن‌ها می‌توان به پروب گوه ای^۴ که توسط Schatz و Casey [۱۰]، با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد اشاره نمود. این پروب قابلیت اندازه‌گیری فشار سکون، درجه حرارت، زاویه Yaw و Pitch را به همراه تعیین محدوده مناسبی از اندازه قطره را از خود بروز داده است. در پروب مذکور، محور اتساع نور در امتداد محور اصلی و گوه در کنار مسیر اتساع نور واقع شده است به این ترتیب داده‌های فشاری و نوری می‌توانند در یک موقعیت شعاعی جریان اخذ شوند. در این تحقیق [۱۰]، خروجی LP یک مدل توربین در دانشگاه اشتوتگارت اندازه‌گیری شد که میانگین رطوبت خارج شده و قطر قطرات به ترتیب برابر با ۱۳٪ و ۰/۵ میکرومتر است گزارش شد.

Cai و همکاران [۱۱] همچنین یک پروب نوری پنوماتیکی را از ترکیب میرایی چند طول موجی^۵ با یک پروب گوه‌ای چهار سوراخه^۶ ارائه کردند. آن‌ها در خروجی LP یک توربین بخار ۳۰۰ مگاواتی هواخنک، توزیع اندازه قطرات، مقدار رطوبت، زاویه Yaw و Pitch، عدد ماخ و سرعت را در فشارهای انتهایی (Back Pressure) مختلف اندازه‌گیری کردند. در بیشتر موارد، حداکثر رطوبت موضعی در وسط حدود دو برابر نواحی نوک و hub بود. قطر متوسط قطرات مه در حدود ۰/۸ میکرومتر بدست آمد که در بالای پره‌های متحرک مقادیر نسبتاً ثابتی مشاهده شده است. مطالعه نتایج [۱۲] که از پروب‌های اپتیکی میرا شونده برای اندازه‌گیری‌های استفاده کرده است،

¹Extinction Probe ²Forward Scattering Method ³Combined pneumatic probe ⁴Wedge Probe ⁵Multiwave length extinction ⁶Four Hole Wedge Probe ⁷In fluid dynamics, Sauter mean diameter (SMD, D32, d32 or D [3, 2]) is an average of particle size. ⁸Inertial and diffusial mechanisms ⁹Water Absorbant Probe ¹⁰Optical photography probe

بودند، در هیچ ناحیه‌ای دنباله جریان^۴ مشاهده نشد. با توجه به اینکه تنها درصدی جزئی از قطرات درشت در لبه فرار استاتور یافت شده، به نظر می‌رسد سیستم مکشی طراحی شده به خوبی عمل کرده است. اندازه‌گیری‌ها و گزارشات نشان می‌دهد که مناطق با بالاترین جریان جرمی حاوی بزرگترین شعاع قطرات بوده و در نزدیکی سطح مکش اتفاق می‌افتد. در ناحیه نسبت رطوبت بالاتر (OP-3) تعداد قطرات کمی بیشتر اما جریان جرمی قطره‌های درشت و حداکثر مقدار D_{32} ^۵ آن، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده مشابه در نقطه OP-2 بود.



شکل ۱: نحوه عملکرد پروب توزیع معکوس امواج نوری

Cai و همکاران [۱۹] یک پروب نوری و پنوماتیک یکپارچه با قطر نوک ۲۰ میلی‌متر ساختند، (شکل ۲). در این پروب با استفاده از روش پراکندگی پیش‌رو با استفاده از پرتوهای نور بسیار باریک چندگانه^۶، قطرات درشت مایع را اندازه‌گیری نمودند. در این روش دامنه و مدت نوسان سیگنال نوری هنگامی عبور یک قطره بزرگ از میان دو پرتو مبین ابعاد و سرعت قطره است. قابلیت چرخش پروب باعث می‌شود که قطرات همواره از میان دو پرتو عبور کرده و به این ترتیب جهت حرکت آن‌ها نیز قابل تشخیص است.



شکل ۲: مشاهده یک پروب نوری و نیوماتیک یکپارچه با نوک ۲۰ میلی‌متری. پروب فوق قابلیت اندازه‌گیری قطرات درشت مایع را تا قطر ۴۰۰ میکرون و قطرات ریز را به ترتیب با استفاده از روش پراکندگی نور پیش‌رو و تکنیک نوری میرا داراست، [۱۹]

پروپ مذکور همچنین اندازه‌گیری قطرات مه و میدان جریان بخار را به ترتیب از طریق استفاده از روش میرایی نور و جانمایی پروب گوه‌ای نشان داده شده در شکل ۲ انجام به طور همزمان انجام می‌دهد. آزمایش‌های انجام

پدال LED^۱ توسعه دادند. در این طرح، Vernon و همکاران یک دوربین کوچک و لنز آن درون یک لوله فولادی ضدزنگ استوانه‌ای با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر تعبیه نمودند. دستگاه مذکور دارای یک نوک پروب تیتانیومی است که به وسیله تکنیک‌های تولید additive از کانال‌های کوچکی برای پاکسازی مایع را کد با استفاده از هوای پرفشار مجهز شده است. هوای پرفشار از قرارگیری مایع در محل اتساع نور در نوک پروب جلوگیری می‌نماید. تصاویر دوقطبی حاصله، مقادیر سرعت و اندازه شعاع قطره‌ها را با وضوح $1/375 \mu\text{m}/\text{pixel}$ استخراج می‌کنند. زمان قرار گرفتن در معرض نور ۱۰۰ نانومتر در هر پالس است و زمان بین دو پالس ۳۰ میکروثانیه است. بوسیله این دستگاه میانگین ابعاد قطر و متوسط سرعت قطرات سنج شده در یک اسپری آب هوا به ترتیب ۱۵ تا ۳۰ میکرومتر و ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه محاسبه شد که این محدوده‌ها نشان دهنده دامنه عملیاتی و دقت پروب‌های عکاسی نوری مطرح شده است.

Bosdas و همکاران [۱۶، ۱۵] یک پروب توزیع معکوس امواج نوری^۲ (FRAP-OB) را برای قطرات درشت معرفی کرد. این پروب (شکل ۱) دارای قطر نوک ۵ میلی‌متر بوده و یک ابزار اندازه‌گیری "تک ذره‌ای"^۳ است. این ابزار دارای یک دیود نوری مینیا توری با پهنای باند بالاست است که نور منعکس شد از قطرات تنها را جمع‌آوری کرده و شعاع و سرعت قطرات را از داده‌های کالیبراسیون تعیین می‌کند. قابلیت تشخیص قطرات $30 - 110 \mu\text{m}$ را با دقت $\pm 5/4 \mu\text{m}$ و سرعت ذره‌های تا 170 m/s (ماخ ۰/۵) را داراست. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نور تک طول موجی (۶۳۲ نانومتر) قطبی شده از یک لیزر He-Ne با توان ۲۸ میلی‌وات از طریق فیبر نوری هدایت می‌شود و در نقطه‌ای با فاصله ۱۵ میلی‌متر از نوک پروب متمرکز شده و حجم نمونه‌ای را تشخیص می‌دهد. قطرات در همه جهات از این حجم فیبر نوری تشکیل شده عبور می‌کنند، اما فقط نور با زاویه‌های ثابت بین ۱۵ و ۱۵۸ درجه می‌تواند تصاویر مورد نیاز را ضبط کند. علت انتخاب این زاویه بالا بودن حساسیت شدت پراکندگی بوده به نحویکه به وضوح ابعاد قطره مورد نظر قابل مشاهده است. تکنیک تشخیص احجام کوچک (تقریباً ۰/۱ میلی‌متر مکعب) باعث کاهش اشتباهات ناشی از حضور همزمان چند قطره در یک فضا شده و فاصله ناچیز آن از نوک باعث کاهش اختلالات شناسایی مسیر حرکت قطره می‌شود. علاوه بر این، پروب مذکور مجهز به یک سیستم هوای پرفشار پاک کننده است تا سطح نوک را از انسداد آب آزاد کند.

Bosdas و همکاران [۱۷، ۱۸] آزمایشات را با استفاده از پروب FRAP-OB در یک دوربین LP چهار مرحله‌ای با قراردادن آن در ۲ میلی‌متری پایین دست تر از خروجی آخرین مرحله استاتور انجام دادند. به منظور حذف فیلم آب در دو سمت خروجی ابزاری برای مکش نصب کردند. توزیع متوسط زمانی تعداد قطره‌ها برای دو نقطه عملیاتی، OP-2 و OP-3، اندازه‌گیری و نسبت رطوبت محاسبه شده به ترتیب ۶/۲ و ۳/۶ درصد به دست آمد، در حالیکه میدان‌های سرعت بخار تقریباً یکسان بودند. قطرات در محدوده اندازه‌گیری ۳۰ تا ۱۱۰ میکرومتر در طول تمام گذرگاه استاتور قابل ملاحظه

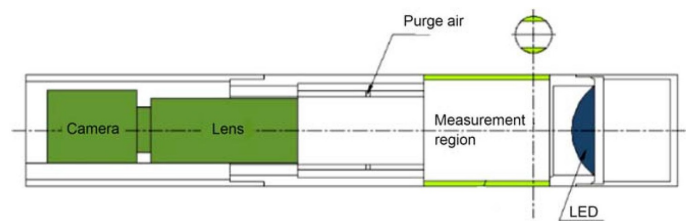
¹Light Emitting Diode ²Optical Back scatter Probe ³Single Particle ⁴Wake Flow ⁵In fluid dynamics, Sauter mean diameter (SMD, D_{32} or $D[3, 2]$) is an average of particle size. ⁶multiple thin light beams

مناسب مهندسی از شرایط جریان دوفازی و کاهش تلفات ناشی از رطوبت شده است. به نحویکه اندازه‌گیری‌های اخیر نسبت رطوبت [۱۹] در شرایط مشابه نشان می‌دهد تکنیک‌های اعمال شده جهت کاهش این نسبت موثر بوده است. نتایج آزمایشات تا دهه ۹۰ میلادی [۳، ۶]، نشان می‌داد که قطرات درشت در نسبت حجمی بین ۵ تا ۸ درصد حجم کلی مایع خروجی را تشکیل می‌دهند در حالیکه در تحقیقات اخیر این نسبت به مقدار ۰/۱۵٪ کاهش یافته است [۲۰]. از دلایل این امر می‌توان به افزایش دقت ابزار اندازه‌گیری و رشد تکنولوژی دز زمینه کاهش فاز مایع در جریان دوفازی اشاره نمود. با وجود توسعه ابزارهای مورد استفاده، این بخش از صنعت نیازمند طراحی ابزاری با دقت و حساسیت بالاتر و همچنین با قابلیت اندازه‌گیری رژیم مرطوب در ناپایداری‌های جریان و حالت مافوق صوت است.

مراجع

- [1] Baumann, K. Some recent developments in large steam turbine practice. *Journal of the institution of electrical engineers*, 59(302):565-623, 1921.
- [2] Gyarmathy, Georg. Foundations of a theory of the wet-steam turbine. tech. rep., AIR FORCE SYSTEMS COMMAND WRIGHT-PATTERSON AFB OH FOREIGN TECHNOLOGY DIVISION, 1966.
- [3] Walters, PT. Wetness and efficiency measurements in lp turbines with an optical probe as an aid to improving performance. in *1985 Joint Power Generation Conference: GT Papers*, pp. V001T03A001-V001T03A001. American Society of Mechanical Engineers, 1985.
- [4] Tanuma, Tadashi. *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*. Woodhead Publishing, 2017.
- [5] Black, David Lee, McQuay, Mardson Queiroz, and Bonin, Michel P. Laser-based techniques for particle-size measurement: a review of sizing methods and their industrial applications. *Progress in energy and combustion science*, 22(3):267-306, 1996.
- [6] Williams, GJ and Lord, MJ. Measurement of coarse water distribution in the lp cylinders of operating steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 190(1):59-69, 1976.
- [7] Mahpeikar, M and Lakzian, E. Investigating the measurement of droplet diameter in two-phase flow of steam turbine. in *14th Iranian society of mechanical engineering conference*, 2006 (in Persian).
- [8] Tatsuno, K and Nagao, S. Water droplet size measurements in an experimental steam turbine using an optical fiber droplet sizer. *Journal of heat transfer*, 108(4):939-945, 1986.
- [9] Bakhtar, F. Special issue on wet steam-part 1. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(8):i-iii, 2004.
- [10] Schatz, M and Casey, M. Design and testing of a new miniature combined optical/pneumatic wedge probe for

شده در یک مدل توربین بخار سه مرحله‌ای کاهش قابل توجه‌ای را نسبت به کارهای قبلی در ابعاد اندازه‌گیری شده قطرات درشت (کاهش قطر قطرات از ۱۲۰ به $70\ \mu\text{m}$) در مرحله آخر توربین نشان می‌دهد. به این ترتیب، Cai و همکاران [۱۹]، نتیجه گرفتند که تکنیک‌هایی که اخیراً برای کاهش رطوبت در ساخت توربین‌های استفاده شده، در این موضوع موثر بوده است. یانگ و همکاران [۲۰] یک پروب تصویربرداری را برای اندازه‌گیری سایز قطره‌های درشت و ریز که از ترکیب یک لنز تلسکوپ، یک دوربین CMOS رنگی و یک LED، ۳ یا ۵ وات با نور سفید (شکل ۳) ساخته شده است، معرفی نمودند. سیگنال‌های RGB^۲ حاصل از پیکسل سنسور CMOS بر اساس نظریه میرایی نور چند طول موجی^۳ جهت به دست آوردن رطوبت کلی و توزیع قطرات مه به کار می‌روند. دوربین تعبیه شده نیز با گرفتن تصاویری از قطرات آب درشت، پارامترهای قطرات درشت آب را تشخیص می‌دهد. با تجزیه و تحلیل تصاویر اخذ شده بر اساس "Single-Frame Single-Exposure"، اندازه، سرعت، جهت جریان و غلظت قطرات درشت آب به دست می‌آید. پروب مزبور با قطر ۵۰ میلی‌متر و طول ۵ متر دارای ابعاد بزرگی است، اما زمان قرار گرفتن در معرض برابر با ۱ میکرون به اندازه کافی برای اندازه‌گیری سرعت قطرات قطرات تا ۵۰۰ متر بر ثانیه اندک طراحی شده است.



شکل ۳: مشاهده یک پروب عکس بردار شامل یک لنز تلسکوپ، یک دوربین CMOS رنگی و یک LED، ۳ یا ۵ وات با نور سفید، که به طور همزمان پارامترهای مربوط به قطرات درشت و ریز را تعیین می‌کند. علاوه بر این مسیر پاکسازی آب‌های ساکن توسط هوای پرفشار قابل ملاحظه است [۲۰].

در این تحقیق [۲۰]، اندازه‌گیری‌ها بر روی ۹۰۵ میلی‌متر انتهایی پره‌های مرحله آخر یک توربین ۳۳۰ مگاواتی انجام شد و نتایج شامل نسبت رطوبت و قطر قطرات مه (که از ۶٪ به ۹٪ و از ۷/۷ تا ۰/۹ میکرومتر متغیر بود)، اندازه توزیع قطرات آب درشت از ۴۰ تا ۲۳۰ میکرومتر (با اکثریت بین ۸۰ تا ۱۱۰ میکرومتر) و دامنه سرعت آن‌ها عمدتاً بین ۴۰ و ۷۰ متر بر ثانیه می‌باشد. علاوه بر این، زاویه جریان قطره اندازه‌گیری شد و مشخص شد که بازه تغییرات عمدتاً بین ۴۲ تا ۸۸ درجه است. متوسط رطوبت اندازه‌گیری شده ناشی از قطرات درشت تنها برابر با ۰/۱۵٪ گزارش شده است.

۳ نتیجه‌گیری

روش‌های مختلف اندازه‌گیری قطرات ریز و درشت مطرح شده توسط محققان مختلف شامل کارهای پر ارزش قدیمی [۱-۳] و توسعه‌های اخیر این صنعت بررسی شد. مطالعه روند کارهای انجام شده نشان می‌دهد که پیشرفت‌های اخیر در روش‌های اندازه‌گیری قطرات ریز و درشت منجر به درک

¹complementary metal oxide semiconductor ²Red Green Blue ³multiwavelength light extinction

- the measurement of steam wetness. in *AIP Conference Proceedings*, vol. 914, pp. 464-479. AIP, 2007.
- [11] Cai, X, Ning, T, Niu, F, Wu, G, and Song, Y. Investigation of wet steam flow in a 300 mw direct air-cooling steam turbine. part 1: Measurement principles, probe, and wetness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(5):625-634, 2009.
- [12] Young, JB, Yau, KK, and Walters, PT. Fog droplet deposition and coarse water formation in low-pressure steam turbines: a combined experimental and theoretical analysis. *Journal of turbomachinery*, 110(2):163-172, 1988.
- [13] Kleitz, A and Dorey, JM. Instrumentation for wet steam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(8):811-842, 2004.
- [14] Vernon, Kris, Hann, David, and Rice, Tim. Pulsed light-emitting diode photography for coarse water characterization. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(1):011602, 2015.
- [15] Bosdas, Ilias, Mansour, Michel, Kalfas, Anestis I, and Abhari, Reza S. An optical backscatter probe for time resolved droplet measurements in turbomachines. *Measurement Science and Technology*, 27(1):015204, 2015.
- [16] Bosdas, I, Mansour, M, Kalfas, A.I., and Abhari, R.S. Temporally and spatially resolved particle size and speed measurements in subsonic and transonic turbomachines. in *Presented at the ISABE Conference*, Phoenix, Arizona, 2015.
- [17] Bosdas, Ilias, Mansour, Michel, Kalfas, Anestis, Abhari, Reza, and Senoo, Shigeki. Unsteady wet steam flow field and droplet measurements at the last stage of low-pressure steam turbine. *IGTC (Tokyo, Japan)*, 2015.
- [18] Bosdas, Ilias, Mansour, Michel, Kalfas, Anestis I, Abhari, Reza S, and Senoo, Shigeki. Unsteady flow field and coarse droplet measurements in the last stage of a low pressure steam turbine with supersonic airfoils near the blade tip. in *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, pp. V008T26A039-V008T26A039. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [19] Cai, Xiaoshu, Ning, Deliang, Yu, Jiangfeng, Li, Junfeng, Ma, Li, Tian, Chang, and Gao, Wei. Coarse water in low-pressure steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 228(2):153-167, 2014.
- [20] Yang, Bin, Xiang, Yanhui, Cai, Xiaoshu, Zhou, Wu, Liu, Hao, Li, Shizhu, and Gao, Wei. Simultaneous measurements of fine and coarse droplets of wet steam in a 330 mw steam turbine by using imaging method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 231(3):161-172, 2017.