

اندازه‌گیری غیرتداخلی غلظت در فرایندهای شیمیایی به روش فلئورسانسی القایی با لیزر

فهیمة سبحانیان^۱، سلمان موحدی‌راد^{۲*}، محمدتقی صادقی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۳

پیام نگار: movahedirad@iust.ac.ir

چکیده

از جمله روش‌های غیرتداخلی که برای اندازه‌گیری غلظت یک جزء خاص در سیال به کار می‌رود، فلئورسانسی القایی با لیزر (LIF)^۱ است. در این روش از یک لیزر به منظور انگیختن جزء موردنظر با خاصیت فلئورسانسی استفاده می‌شود. معمولاً رنگدانه‌هایی مانند رودامین^۲ یا فلئورسانسی^۳ به عنوان ردیاب به کار می‌روند. ردیاب بخشی از انرژی تابشی لیزر را جذب و سپس قسمتی از این انرژی جذب شده را به صورت تابش فلئورسانسی با طول موج بالاتر گسیل می‌کند. نور بازتابیده از ردیاب پس از عبور از صافی توسط دوربین CCD دریافت و برای اندازه‌گیری میدان غلظت به کمک نرم‌افزار پردازش می‌شود. فلئورسانسی القایی با لیزر روشی موثر در اندازه‌گیری میدان غلظت و دما در کارهای آزمایشگاهی است. در این مطالعه علاوه بر توصیف فلئورسانسی و خواص آن ابزارهای به کار رفته برای اندازه‌گیری غلظت، مبانی نظری و برخی کارهای انجام شده با کمک این روش بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: فلئورسانسی القایی با لیزر، تصویر، میدان غلظت

۱. مقدمه

فلئورسانسی فرایندی تابشی است که با انتقال الکترون درون مولکول‌ها انجام می‌شود. با قرارگیری رنگدانه فلئورسانسی در معرض میدان الکترومغناطیسی، ورود فوتون‌ها به مولکول باعث جابجایی الکترون‌ها از یک سطح انرژی به سطح انرژی دیگر می‌شود. این جابه‌جایی به افزایش انرژی پتانسیل مولکول از حالت پایه S_0 به

حالت برانگیخته الکترونی S_1 منجر می‌شود. با بازگشت الکترون به حالت پایه، نور فلئورسانسی به صورت فرایندی تابشی گسیل می‌شود [۱].

برای مصورسازی جریان سیال، روش‌های مختلفی مانند ردیابی ذرات [۲] و روش‌های نوری شامل پراکندگی ریلی^۴ [۲]، پراکندگی رامان^۵ [۲] و فلئورسانسی القایی با لیزر (LIF) [۲] استفاده می‌شود. به دلیل مزیت‌های فلئورسانسی القایی با لیزر مانند امکان اندازه‌گیری غلظت مطلق و اندازه کوچک مولکولهای رنگدانه نسبت به روش‌های

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

1. Laser Induced Fluorescence
2. Rhodamine
3. Fluorecein

4. Reighley
5. Raman

دیگر نوری، این روش برای اندازه‌گیری کمی میدان غلظت در این مطالعه بررسی شده است [۲].

روش‌های پردازش و تصحیح تصاویر همراه با پیشرفت در فناوری تصویربرداری دیجیتال باعث تکامل روش از یک ابزار تصویربرداری کیفی به روش دقیقی برای کمی‌سازی متغیرهای عددی با وضوح فضایی و دقت زمانی بالا شده است.

بهره‌گیری از رنگدانه‌های انحلال‌پذیر در مشاهده جریان‌های آبی، قبلاً در قرن نوزدهم توسط رینولدز (۱۸۸۳) برای انجام آزمایش معروف خود روی جریان آرام و آشفتگی در لوله به کار رفته بود، ولی به کارگیری کمی این روش تا قرن بعد که فلئورسانسی القایی با لیزر معرفی شد، به تاخیر افتاد [۳].

باتوجه به سامانه نوری، فلئورسانسی القایی با لیزر می‌تواند برای تعیین غلظت نسبی در یک نقطه، در یک صفحه یا در یک حجم سه بعدی به کار گرفته شود. متداول‌ترین کاربرد فلئورسانسی القایی با لیزر در مکانیک سیالات به صورت صفحه‌ای (PLIF) است.

در این روش، یک صفحه تخت لیزری با استفاده از ابزارهای نوری مانند عدسی استوانه‌ای در سیال ایجاد می‌شود، رنگدانه را برمی‌انگیزاند و فلئورسانسی گسیل می‌کند. انتخاب لیزر انگیزاننده باید با توجه به طیف جذبی رنگدانه به کار رفته باشد زیرا فقط فصل مشترک میان طیف جذبی رنگدانه و طیف انگیزاننده لیزر توسط رنگدانه جذب می‌شود. این گسیل توسط یک تراشه CCD در یک دوربین دیجیتالی قابل شناسایی است. تصاویر ثبت شده ممکن است به دلایلی مانند وجود نوفه زمینه یا توزیع نایک‌نواخت صفحه لیزری در سیال همراه با خطا باشند. از پردازش تصویر برای تصحیح تصاویر استفاده می‌شود.

در فلئورسانسی، تابش گسیلیده طول موجی بلندتر و در نتیجه انرژی کمتری نسبت به تابش جذب شده دارد. این اختلاف انرژی به دلیل اتلاف در مسیر بازگشت الکترون برانگیخته به حالت پایه، ناشی از آثاری چون برخورد با مولکولهای دیگر است. از این نکته برای جداکردن پرتو تابشی لیزر و گسیل فلئورسانسی با به کارگیری پالایه قبل از دوربین ردیاب استفاده می‌شود [۴].

شدت فلئورسانسی گسیلیده با تعداد الکترون‌ها در حالت برانگیخته نسبت مستقیم دارد؛ پس می‌توان از این طریق اطلاعاتی در مورد غلظت اجزا به دست آورد. همچنین، چون جمعیت الکترون‌ها با دمای گونه‌ها نسبت مستقیم بستگی دارد، پس

می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری توزیع دو بعدی دما نیز استفاده کرد [۳].

فلئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای در طیف وسیعی از کارهای آزمایشگاهی، از جمله اندازه‌گیری دما، چگالی و آهنگ اختلاط به کار گرفته شده است [۵]. باتوجه به اهمیت غلظت در فرایندهای شیمیایی، اندازه‌گیری این کمیت عددی در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. خاصیت فلئورسانسی

لومینسانس^۲ عبارت است از گسیل فرابنفش، مرئی یا فروسرخ فوتون‌هایی که الکترون‌ها آنها را برانگیخته باشند. اگر الکترون‌ها با جذب فوتون برانگیخته شده باشند، گسیل غیرگرمایی اتفاق می‌افتد. یکی از آثار ناشی از این گسیل، فلئورسانسی است.

همیشه رنگ نور تابانده شده به جسم با رنگ نوری که از جسم بازمی‌تابد، تفاوت دارد. در واقع، کل انرژی جذب شده توسط مولکول ممکن است از راه‌های مختلفی مثل گسیل فوتون در محیط آزاد شود. یعنی انرژی بازتابنده قسمتی از کل انرژی آزاد شده است. پس، انرژی فوتون گسیلیده کمتر از فوتون جذب شده است. به این پدیده جابه‌جایی استوکس گفته می‌شود. بنابراین، حداکثر طیف نشر در مقایسه با حداکثر طیف جذبی به سمت طول موج بلندتر جابه‌جا می‌شود.

در شکل (۱)، طرح ساده‌ای از نمودار موضع نسبی طیف‌های جذبی و فلئورسانسی را مشاهده می‌کنید. سطوح لرزشی در هر حالت الکترونی به صورت زیرلایه قرار گرفته‌اند. جذب نور (فوتون) توسط جمعیتی از مولکول‌ها باعث انتقال الکترون‌ها از سطح الکترونی حالت پایه S_0 به حالت برانگیخته $(S_n, n>0)$ می‌شود.

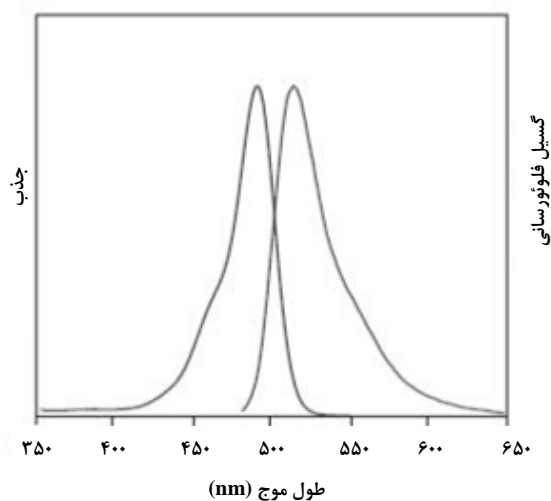
یک مولکول برانگیخته در S_n ممکن است با آزاد کردن بخشی از انرژی خود به محیط، به سطح برانگیخته S_1 برگردد. به این پدیده غالباً تبدیل درونی^۳ می‌گویند. سپس مولکول می‌تواند از حالت برانگیخته S_1 با گسیل یک فوتون (فلئورسانسی) به حالت پایه S_0 برود.

معمولاً، از یک رنگدانه آلی مانند فلئورسانسی یا رودامین به عنوان ردیاب فلئورسانسی استفاده می‌شود. رنگدانه بخشی از انرژی تحریک را جذب و به‌طور خودبه‌خودی قسمتی از انرژی جذب شده را به صورت فلئورسانسی گسیل می‌کند.

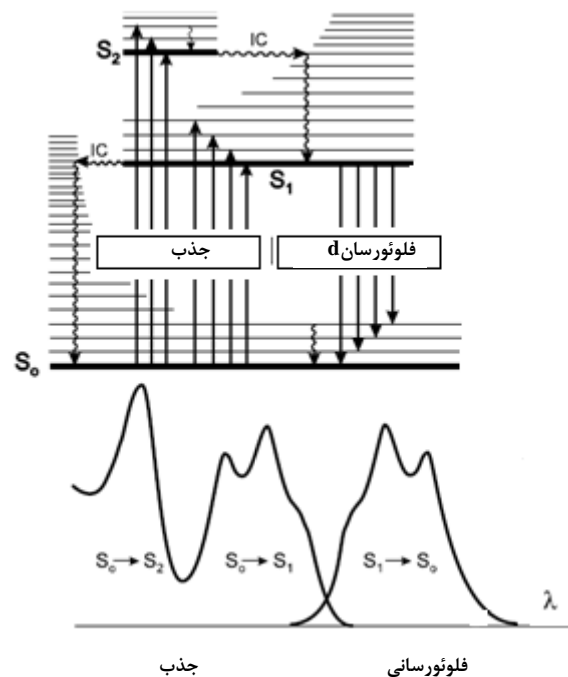
2. Luminescence
3. Internal Conversion (IC)

1. Planar Laser Induced Fluorescence

رنگدانه‌های رودامین به‌طور کلی سمی‌اند و در آب، اتانول و متانول حل می‌شوند [۷].



شکل ۲. طیف جذبی و گسیلی فلئورسانسی فلئورسانسی در محلول بافری [۶].



شکل ۱. موضع نسبی طیف‌های جذبی و فلئورسانسی [۱].

رودامین 6G از خانواده رنگدانه رودامین است که فلئورسانسی بالایی دارد و دارای حداکثر طول موج جذب ۵۳۰ nm و حداکثر طول موج گسیل ۵۶۶ nm است [۸].

در جدول (۱) پارامترهای اصلی اندازه‌گیری شده برای این سه رنگدانه متداول در محلول‌های آبی درج شده است.

در این جدول $\lambda_{max,em}$ و $\lambda_{max,abs}$ به ترتیب، نشان‌دهنده حداکثر طول موج جذب و گسیل، ϵ ضریب جذب اندازه‌گیری شده در طول موج ذکر شده و D تراوایی مولکولی در دمای ۲۰ °C است.

فلئورسانسی یک ترکیب آلی مصنوعی است که به صورت گرد نارنجی تیره/قرمز حلال در آب و الکل یافت می‌شود. این ترکیب به عنوان ردیاب فلئورسانسی کاربردی گسترده دارد. این ماده دارای حداکثر طول موج جذب ۴۹۴ nm و حداکثر طول موج گسیل ۵۲۱ nm در آب است (شکل (۲)) [۶].

رودامین خانواده‌ای از ترکیب‌های شیمیایی با خاصیت فلئورسانسی است. نمونه‌ای از این ترکیب‌ها شامل رودامین 6G و رودامین B است که اغلب به عنوان رنگدانه ردیاب در آب برای تعیین آهنگ و جهت جریان و انتقال به‌کار گرفته می‌شود.

جدول ۱. خصوصیات سه رنگدانه فلئورسانسی به‌کار رفته در محلول‌های آبی [۳].

D (cm ² /s)	ϵ (cm M) ⁻¹	$\lambda_{max,em}$ (nm)	$\lambda_{max,abs}$ (nm)	رنگدانه
$5/1 \times 10^{-6}$	$8/5 \times 10^4$ (۴۸۸/۰ nm)	۵۱۵	۴۹۰	فلئورسانسی
$1/2 \times 10^{-6}$	$1/1 \times 10^5$ (۵۱۴/۵ nm)	۵۵۵	۵۲۵	رودامین 6G
$3/7 \times 10^{-6}$	$8/6 \times 10^4$ (۵۱۴/۵ nm)	۵۸۰	۵۵۵	رودامین B

۱.۲ قانون بیر - لمبارت^۱

در این رابطه $\epsilon = \frac{\alpha_0}{2.303}$ ضریب تضعیف مولی (یا ضریب جذب مولی) با یکای $M^{-1}cm^{-1}$ (برای تمام مواد)، C غلظت، و l طول مسیر، به ترتیب، برحسب مولاریته، M ، و cm اند [۹].

۲.۲ رابطه طیف گسیلی و طول موج برانگیزش

چون همه مولکولهای موجود در حالت برانگیخته در فرایند فلئورسانسی شرکت نمی کنند، بازده کوانتومی Φ_F ، بنابر تعریف عبارت است از:

$$\Phi_F = \frac{F}{I_A} \quad (۳)$$

در این رابطه، F شدت فلئورسانسی تابشی و I_A شدت جذب شده است.

همه از $\Phi_F < 1$ است زیرا

$$I_A = I_0 - F \quad (۴)$$

شدت فلئورسانسی بازتابنده از نمونه را می توان از این قرار به دست آورد:

$$I_A = I_0 - I_T \quad (۵)$$

در این رابطه، I_T شدت انتقال یافته در اثر عبور از نمونه است که بند ۲-۱ تعریف شد. می دانیم که

$$I_T = I_0 10^{-\epsilon Cl} = I_0 e^{-2.3\epsilon Cl} \quad (۶)$$

بنابراین،

$$I_A = I_0 - I_0 e^{-2.3\epsilon Cl} = I_0 (1 - e^{-2.3\epsilon Cl}) \quad (۷)$$

در چگالی های نوری بسیار کم، معادله (۷) را می توان به صورت زیر نوشت [۹]:

$$I_0 (1 - (1 - 2.3\epsilon(\lambda)Cl)) = 2.3I_0\epsilon(\lambda)Cl \quad (۸)$$

با نشان دادن I_A برحسب Φ_F ، I_F محاسبه می شود:

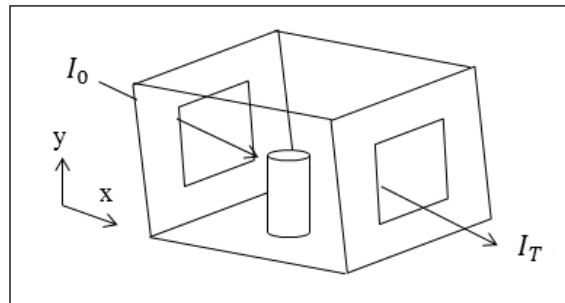
$$F(\lambda) = 2.3I_0\epsilon(\lambda)Cl\Phi_F \quad (۹)$$

این قانون بیان ریاضی چگونگی جذب نور توسط ماده (محلول، جامد یا گاز) است. بنابراین قانون، شدت نور عبوری از یک نمونه را سه پارامتر کاهش می دهد: مقدار ماده جاذب (غلظت C)، طول مسیر نوری، l که بیانگر مسافتی است که نور با عبور از نمونه طی می کند، و ضریب تضعیف ماده (ϵ) که به معنی احتمال جذب فوتون عبوری توسط نمونه است.

نمونه ای از یک ماده جاذب را در نظر بگیرید که میان دو دریچه موازی قرار دارد (شکل (۳)). فرض می کنیم نور با شدت I_0 از چپ می تابد و در جهت x منتشر می شود، پس شدت I به آرامی از چپ به راست کاهش می یابد و با شدت I_T خارج می شود. اگر نمونه همگن باشد، کاهش کسری در شدت نور با عبور از بازه کوچک dx یکسان است. چون کاهش کسری شدت در یک محلول به طور خطی به غلظت ماده جاذب بستگی دارد، تغییر کسری در شدت نور $\frac{dI}{I}$ می تواند در قالب معادله (۱) بیان شود:

$$-\frac{dI}{I} = \alpha_0 C dx \quad (۱)$$

در این معادله، C غلظت ماده جاذب $[M]$ و α_0 ثابت تناسب است [۴].



شکل ۳. طرح نموداری قانون بیر - لمبارت.

با انجام این آزمایش در کاوت^۲هایی با طول مسیرهای مختلف، دیده می شود که با افزایش طول مسیر و غلظت محلول جاذب شدت انتقال یافته I_T بصورت نمایی کاهش می یابد. چگالی نوری (A) در قالب معادله (۲) تعریف می شود:

$$A = \log \frac{I_0}{I_T} = \epsilon Cl \quad (۲)$$

1. Beer-Lambart
2. Cuvette

موضعی I ممکن است به‌طور جزئی باتوجه به غلظت لحظه‌ای در طول مسیر پرتو تغییر کند. بنابر قانون بیر-لمبارت پرتوی از نور با شدت I که از مسیر بسیار کوتاه dr از میان محلول با غلظت رنگدانه C عبور می‌کند، بر اثر جذب، دستخوش تغییر شدتی از این قرار خواهد شد:

$$\frac{dI}{I} = -\epsilon C dr \quad (13)$$

در این رابطه، ϵ بیانگر ضریب جذب رنگدانه یا تضعیف پرتو تابشی است. با فرض وجود پرتوی که از فاصله $r = r_0$ تا $r = r_1$ از میان میدان غلظت متغیر فضایی عبور می‌کند، شدت موضعی پرتو عبارت است از:

$$I(r_1) = I(r_0) \exp \left[-\epsilon \int_{r_0}^{r_1} C(r) dr \right] \quad (14)$$

اگر یک حجم منشوری قائم خیلی کوچک را با سمتگیری در امتداد محور پرتو تابشی در نظر بگیریم (شکل (۴))، حجم آن از رابطه $dV = dr \cdot dA$ به‌دست می‌آید، که dr طول منشور در جهت پرتو و dA سطح مقطع منشور در معرض پرتو است. رنگدانه‌ای که با غلظت C در این حجم جای گرفته، بر اثر تحریک با شدت موضعی I ، تابشی با توان زیر را در همه جهات نشان می‌دهد:

$$df = -\phi dIdA \quad (15)$$

با ترکیب معادلات (۱۳) و (۱۵) می‌رسیم به:

$$dF = \phi \epsilon I C dV \quad (16)$$

در اغلب آزمایش‌های فلئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای یک ابزار تشکیل صفحه مانند عدسی استوانه‌ای در مبدا قرار گرفته (شکل (۴)) و با عبور پرتو از آن، صفحه لیزری شعاعی حاصل می‌شود. در شرایطی که فاصله شعاعی در مقایسه با قطر پرتو ورودی بلند است، توزیع شدت صفحه را می‌توان از این قرار نوشت.

$$I(r, \theta, z) = Pa(r, \theta) f(r) g(\theta) h(z) \quad (17)$$

معادله (۹) رابطه بین شدت فلئورسانسی بازتابنده در طول موج (λ)، شدت نور تابشی به نمونه با شدت اولیه I_0 ، بازده کوانتومی Φ_F و ضریب تضعیف مولی نمونه در طول موج (λ) را نشان می‌دهد. باتوجه به این رابطه، می‌توان گفت بازده کوانتومی بالا منجر به شدت فلئورسانسی بیشتر می‌شود و از آنجا که ϵ به طول موج وابسته است، شدت فلئورسانسی نیز به طول موج وابسته خواهد بود.

۳. نظریه کلی فلئورسانسی

رابطه کلی بین شدت فلئورسانسی، F ، شدت برانگیختگی موضعی، I ، و غلظت موضعی، C ، از این قرار است.

$$F \propto \frac{I}{1+I/I_{sat}} C \quad (10)$$

در این رابطه، I_{sat} شدت نور اشباع برای رنگدانه است [۳].

پس از جذب یک فوتون، الکترون‌ها به‌سرعت با جابه‌جایی میان سطوح لرزشی انرژی خود را از دست می‌دهند. این کاهش انرژی ممکن است از طریق تابش فلئورسانسی یا به‌صورت ناتابشی، به‌ترتیب، با آهنگهای κ_r و κ_{nr} است و آهنگ کلی عبارت است از $\kappa_e = (\kappa_r + \kappa_{nr})$. اشباع زمانی اتفاق می‌افتد که آهنگ جذب نور تابشی با آهنگ کلی کاهش انرژی κ_e برابر شود. شدت تابشی در حالت اشباع، عبارت است از:

$$I_s = \kappa_e / \sigma \quad (11)$$

در این معادله $\sigma [m^2]$ فصل مشترک طیف جذبی رنگدانه و طیف گسیلی لیزر است که توسط رنگدانه جذب می‌شود [۱۰]. حد اشباع به رابطه غیرخطی میان I و F منجر می‌شود. ولی به‌ازای $I \ll I_{sat}$ ، تحریک ضعیف در نظر گرفته شده و معادله (۱۰) به صورت زیر خطی می‌شود:

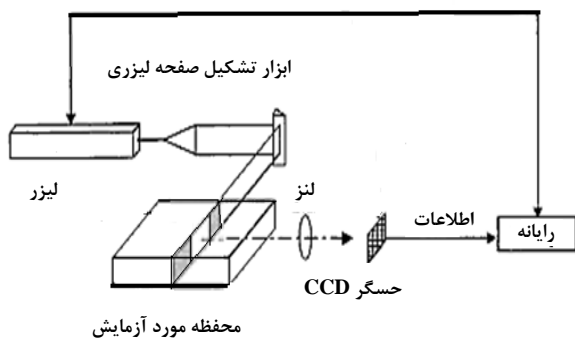
$$F \propto IC \quad (12)$$

به کمک معادله (۱۲) می‌توان غلظت موضعی را از طریق اندازه‌گیری F به‌آسانی به‌صورت آزمایشگاهی به‌دست آورد. شدت تحریک

$$F = \phi \epsilon P a(r, \theta) f(r) g(\theta) C \Delta A \quad (19)$$

در این رابطه، C غلظت متوسط‌گیری شده روی حجم کوچک تصویر شده ΔV است. با فرض این‌که هرگونه جذب مجدد فلئورسانسی توسط رنگدانه در طول مسیر دریافت توسط دوربین چشم پوشیدنی باشد، شدت فلئورسانسی تصویر شده در هر پیکسل دوربین متناظر با مختصات (r, θ) ، عبارت است از:

$$I_F(i, j) = \beta(i, j) \frac{F}{\Delta A} = \alpha(i, j) a(r, \theta) C \quad (20)$$



شکل ۵. تصویر نموداری سامانه آزمایشگاهی [۱۱].

در این رابطه، کسری از کل فلئورسانسی تابشی در تمام جهات که توسط دوربین در یک پیکسل خاص دریافت شده، به صورت $\beta(i, j)$ نشان داده شده و مجموعه ثابتهای مستقل از غلظت (با بعد شدت بر غلظت) است.

$$\alpha(i, j) = \beta(i, j) \phi \epsilon P f(r) g(\theta) \quad (21)$$

به این ترتیب، می‌توان C را از I_F اندازه‌گیری شده به دست آورد.

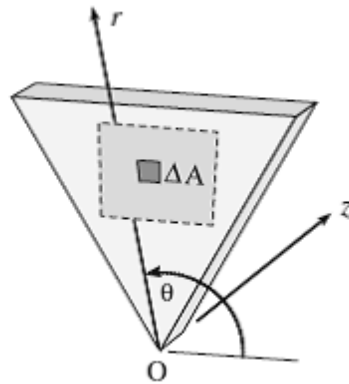
$$C = [\alpha(i, j) a(r, \theta)]^{-1} I_F \quad (22)$$

در اینجا، $a(r, \theta)$ می‌تواند به‌طور عددی برای هر تصویر باتوجه به میدان غلظت لحظه‌ای انتگرال‌گیری شده و $\alpha(i, j)$ را می‌توان به صورت تجربی اندازه‌گیری کرد. با جدا کردن معادلات (۱۸) و (۲۲)

که P توان پرتو ورودی به ابزار تشکیل صفحه و $a(r, \theta)$ تضعیف بدون بعد در مسیر پرتو به دلیل جذب توسط رنگدانه است که باتوجه به معادله (۱۴)، این پارامتر از این قرار به دست می‌آید:

$$a(r, \theta) = \exp[-\epsilon \int_0^r C(r', \theta) dr'] \quad (18)$$

در شکل (۴) دستگاه مختصات بکار گرفته شده برای رسیدن به معادلات فلئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای را مشاهده می‌کنید. در مبدا O ، ابزار تشکیل صفحه لیزری جای می‌گیرد. ناحیه‌ای که با دوربین به تصویر درمی‌آید به صورت مستطیل مشخص شده است و مساحت کوچک‌تر ΔA در معادله (۱۹) و (۲۰) استفاده شده است.



شکل ۴. طرح نموداری از یک صفحه لیزری شعاعی [۳].

توزیع شدت فضایی تضعیف نشده $f(r)g(\theta)h(z)$ صفحه‌هاست. برای صفحه فضایی که در شکل (۴) آورده شده است، $f(r) = r^{-1}$ توابع $g(\theta)$ و $h(z)$ به شکل پرتو اصلی (اولیه) و ماهیت ابزار نوری تشکیل‌دهنده صفحه بستگی دارد و چنان تعریف می‌شوند که انتگرال آنها، به ترتیب، روی کل دامنه θ و z صفحه برابر یک باشد.

دوربین معمولاً عمود بر صفحه لیزری قرار می‌گیرد (شکل (۵)). یک مساحت کوچک $\Delta A = r \Delta r \Delta \theta$ در صفحه لیزری در نظر می‌گیریم. دوربین تابش فلئورسانسی را از یک حجم منشوری قائم ΔV حاصل از تصویر کردن ΔA روی پهنای صفحه، (یعنی کل مقدار $h(z)$) تصویر می‌کند. با انتگرال‌گیری از معادلات (۱۶) و (۱۷) روی این حجم کل، میزان تابش فلئورسانسی به دست می‌آید.

در هر شعاع در زاویه $\theta = \theta_0$ می‌رسیم به:

$$C(k, \theta_0) \approx [\alpha(i, j)]^{-1} I_F \prod_{h=1}^{k-1} \exp[\epsilon C(n, \theta_0) \Delta r] \quad (23)$$

در این رابطه، جزء نمایی از حاصل انتگرال معادله (۲۱) جایگزین شده است. این عملیات در کاربردهای فلوئورسانی القایی با لیزر صفحه‌ای با صفحه لیزری شعاعی آسان نیست، زیرا انتگرال قطبی در طول مسیر پرتو معمولاً براساس داده‌های یک تصویر دکارتی به دست می‌آید. به این دلیل، $a(r, \theta)$ باید خیلی نزدیک به یک باشد؛ این اتفاق ممکن است از طریق ترکیبی از مسیر پرتو کوتاه یا غلظت کم بیفتد.

اگر غلظت در مسیر شعاع یکنواخت باشد، معادلات (۱۴) و (۱۶) به این قرار کاهش می‌یابند:

$$F(r_1) = I(r_0) \phi \epsilon C \exp(-\epsilon r C) \quad (24)$$

این روابط به تعیین تجربی ϵ برای یک رنگدانه مشخص منجر می‌شود.

۴. روش‌های آزمایشگاهی و کارهای انجام شده

۴.۱ سامانه آزمایشگاهی

یک سیستم اندازه‌گیری فلوئورسانی القایی ساده به این ترتیب کار می‌کند:

منبع نوری در طیف طول‌موج تحریک رنگدانه مورد آزمایش می‌تابد. نور از یک پالایه انگیزش عبور می‌کند که تنها طول‌موج تحریک رنگدانه را می‌گذارد و بقیه را مسدود^۱ می‌کند. این طول‌موج عبوری مولکولهای رنگدانه را برمی‌انگیزد و فلوئورسانی گسیلیده از پالایه گسیل عبور می‌کند (این پالایه به منظور کمینه‌سازی پراکندگی نوری در زاویه قائم نسبت به نور تحریک قرار گرفته است). پالایه، تابش گسیلیده ناشی از رنگدانه را جدا و برای اندازه‌گیری به سمت تراشه CCD هدایت می‌کند.

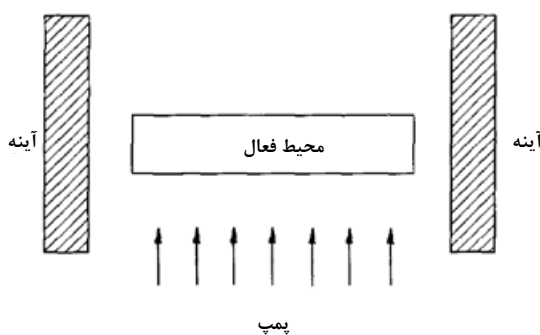
۴.۱.۱ منبع نوری

لامپ یا منبع نوری انرژی موردنیاز برای انگیزش رنگدانه مورد نظر را فراهم می‌کند. این منبع می‌تواند لامپ زنون، لامپ بخار جیوه با

فشار زیاد، لامپ بخار جیوه- زنون، لیزرها یا LEDها باشد. لامپ‌ها طیف گسترده‌ای از نور را بیشتر از طول موجی که برای برانگیختگی نمونه موردنیاز است، می‌تابانند. با استفاده از لیزرها و LEDها می‌توان به طول موج خاص‌تری دست یافت.

۴.۱.۱.۱ لیزرها

لیزر اساساً یک تقویت‌کننده اپتیکی است. لیزر از سه عنصر تشکیل می‌شود: چشمه انرژی خارجی یا دمنده^۲، محیط فعال، و کاواک اپتیکی یا تشدیدگر. این سه عنصر به صورت یک واحد در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. عناصر اساسی لیزر [۹].

بسیاری از لیزرها با توجه به نوع محیط لیزری به کار رفته در آنها نامگذاری می‌شوند. مثلاً، هلیوم- نئون (He-Ne)، کربن دی‌اکسید (CO₂)، آرگون (Ar) و نئودیمیم: نارسنگ ایتیریم آلومینیم (Nd:YAG). محیط لیزری که می‌تواند گاز، مایع یا جامد باشد، طول‌موج تابش لیزری را تعیین می‌کند.

هوکین و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۶ از لیزر آرگون برای اندازه‌گیری میدان غلظت در مخزن همزده استفاده کردند. همچنین، لارسن و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۶ با استفاده از لیزر آرگون تاثیر تخریب فوتوشیمیایی را بر فلوئورسانی القایی با لیزر صفحه‌ای بررسی و شلین [۱۴] در سال ۱۹۸۸ میدان غلظت را در یک جت آشفته با بهره‌گیری از این لیزر پرکاربرد به دست آوردند.

لیزرهای پالسی Nd:YAG با طول‌موج ۵۳۲ nm در اغلب آزمایش‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته و کاربرد آن در سال‌های اخیر در حال افزایش است. ملتون و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۳

2. Pump

1. Block

اکسیژن را در فصل مشترک آب- هوا اندازه‌گیری کردند. همچنین درودچی و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۲ با بکارگیری یک منبع نور LED اختلاط مایع- مایع را در یک بستر میکرو بررسی کردند.

لیزرهای یونی مانند لیزر آرگون دارای مزیت کیفیت پرتو بهتر و خروجی پیوسته‌اند که تصویر برداری جریان را آسان می‌کنند. با کار کردن در مد TEM₀₀ خروجی لیزرهای یونی به صورت پرتوی است که به‌طور قابل قبولی به سطح مقطع گوسین نزدیک و دارای توان خروجی پایاست که مدرج‌سازی سیستم فلئورسانتی القایی با لیزر صفحه‌ای را آسان می‌کند. در مقابل، لیزرهای Nd:YAG دارای کیفیت پرتو کمتری‌اند؛ همچنین، توان و توزیع پرتو ممکن است پالس به پالس تغییر کند. مزیت اصلی لیزرهای Nd:YAG توان خروجی بالای آنها، معمولاً از مرتبه 10^7 W در مدت زمان یک پالس برخلاف خروجی پیوسته 10 W یا کمتر در یک لیزر یونی است. اگرچه مدت پالس Nd:YAG تنها از مرتبه 10 ns است، ولی انرژی در هر بار قرارگیری در معرض تصویر معمولاً بسیار بیشتر از این انرژی در لیزر یونی است [۳].

از سوی دیگر، توان بالای لیزرهای Nd:YAG می‌تواند مشکلاتی ایجاد کند. اگر شدت تحریک لیزر متناسب با شدت اشباع رنگدانه کوچک نباشد، فرض تحریک ضعیف نقض و منجر به رابطه غیرخطی F و I می‌شود. این اثر می‌تواند در لیزرهای پالسی مهم باشد زیرا مدت زمان کوتاه پالس ممکن است به شدت‌های بسیار بالا، حتی در مقایسه با لیزرهای توان بالای پیوسته انجامد. یک لیزر پیوسته که در مد بهینه TEM₀₀ کار می‌کند، دارای حداکثر شدت خط مرکزی $\lambda P/\pi d^2$ است که d قطر پرتو و برابر e^{-2} کانتور شدت است. یک صفحه نوری معمولی که از طریق اسکن یک پرتو پیوسته توسط آینه تشکیل شده، دارای حداکثر شدت از مرتبه 10^7 W/m² است. اگر صفحه پیوسته از طریق پراکندگی لیزر با لنز استوانه‌ای ایجاد شود، شدت حاصل چندین مرتبه کمتر است. یک صفحه نوری معمولی که با لیزر Nd:YAG پالسی تشکیل شده، دارای شدتی از مرتبه 10^{11} W/m² است [۳].

۲.۱.۴ پالایه‌های نوری

پالایه‌های نوری باید با توجه به کاربرد مورد نظر، هزینه، و دوام، به صورت بهینه انتخاب شوند. پالایه‌ها برای عبور بخشی از طیف

از این لیزر برای به‌دست آوردن معیاری مناسب برای آزمایش فلئورسانتی القایی با لیزر صفحه‌ای با استفاده از لیزر توان‌بالا استفاده کرد. مقدس و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از لیزر Nd:YAG میدان غلظت را در جریان حبایی گاز- مایع اندازه‌گیری و دنیل و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۷ این لیزر را به‌منظور اندازه‌گیری محلی انتقال اکسیژن حول یک حباب به‌کار بردند.

لی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۸] از لیزر Nd:YAG به‌منظور اندازه‌گیری غلظت NO در شعله‌های مخلوط هوا و CH₄ و وراک و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۹] غلظت رادیکال هیدروکسیل (OH) را در یک جت پلازما با بکارگیری این لیزر بررسی کردند. همچنین، فونت و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۵ از این لیزر برای بررسی تاثیر عدد رینولدز و نابرابری دو جریان بر اختلاط در یک جت تماسی استفاده کردند.

در آزمایش‌های کمی، از لیزرهای اگزایمر برای تحریک استفاده شده است که از میان آنها می‌توان به آزمایش ون کرونینگن و همکاران [۲۱] در سال ۱۹۹۰ برای تصویربرداری کمی میدان غلظت به روش فلئورسانتی القایی با لیزر صفحه‌ای اشاره کرد. روش دیگر استفاده از لامپ تنگستن به عنوان منبع تحریک و قراردادن یک پالایه طیف تحریک برای محدود کردن این طیف به حداکثر جذب رنگدانه مورد نظر است. پنزکوفر و همکاران [۲۲] در سال ۱۹۸۷ این لیزر را برای بررسی رفتار فلئورسانتی محلول رودامین 6G غلیظ بکار بردند.

باتوجه به علت پدیده فلئورسانتی که بر اثر جذب فصل مشترک طیف جذبی رنگدانه مورد استفاده و طیف نور تابشی لیزر به‌کار رفته اتفاق می‌افتد، انتخاب لیزر باتوجه به رنگدانه مورد استفاده در آزمایش صورت می‌گیرد. همچنین، توان لیزر اهمیت زیادی دارد زیرا در صورت استفاده از لیزری با توان بالا، زمان کمتری برای برانگیختگی رنگدانه مورد نیاز است.

در صورت بهره‌گیری از رنگدانه پیرنه بوتریک‌اسید (PBA)^۱ در اندازه‌گیری غلظت اکسیژن با توجه به طول‌موج جذب $\lambda_{\text{em}} = 341$ nm (PBA) می‌توان از لیزر نیتروژنی برای تحریک رنگدانه فلئورسانتی استفاده کرد. دوک و همکاران [۲۳] در سال ۱۹۹۶ با استفاده از این ترکیب لیزر- رنگدانه میدان غلظت ناشی از جذب

1. Pyrene Butric Acid

۴.۱.۴. گیرنده نوری^۳

نوری که از پالایه گسیلی عبور می‌کند، توسط این ردیاب‌ها دریافت و شدت نور که به‌طور خطی با غلظت جزء متناسب است، به‌صورت بازخوانی دیجیتالی ثبت می‌شود. قطعه بازجفتیده (CCD)^۴ متداولترین سازوکار برای تبدیل تصاویر نوری به سیگنال الکتریکی است. CCD در سی سال اخیر ارتقاء یافته است زیرا می‌توان تصویری با کیفیت مناسب را با استفاده از یک دوربین ارزان به‌دست آورد.

تصاویر دریافتی توسط CCD، به دلیل برخورداری از فاکتورهای خاصی شامل نوفه جریان تاریک^۵ و نوفه بازخوانی^۶ باید تصحیح شوند. این کار با استفاده از مجموعه‌ای از چارچوب تاریک^۷ و میدان مسطح^۸ که می‌توانند از تصویر حذف شوند، انجام می‌شود [۲۶].

CCD یک مدار یکپارچه خاص شامل یک آرایه مسطح دوبعدی از گیرنده‌های نوری کوچک با عنوان پیکسل است. تراشه CCD آرایه‌ای از خازن نیم‌رسانای اکسیدفلزی^۹ (خازن MOS) است که هر خازن نشان‌دهنده یک پیکسل است.

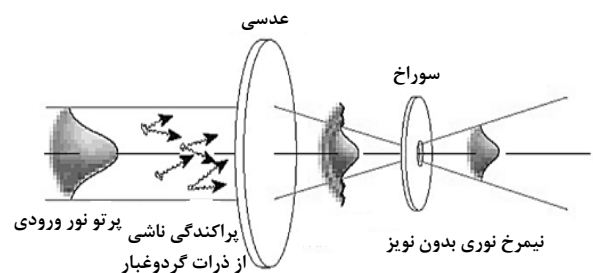
دوربین‌های فیلمبرداری معمولی در اولین آزمایش‌های فلوئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای مورد استفاده قرار می‌گرفتند و عکسهای حاصل برای تحلیل کیفی به‌کار گرفته یا برای بررسی کتی دیجیتالی، می‌شدند. در اوایل دهه ۱۹۹۰، دوربین‌های دیجیتالی CCD به‌کار رفت و استفاده از آن‌ها برای دریافت تصاویر صفحه‌ای متداول شد [۳].

انتخاب یک دوربین دیجیتالی برای یک آزمایش فلوئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای خاص باید با توجه به سه پارامتر حداکثر تعداد پیکسل‌ها، عمق میدان، و آهنگ و سرعت تصویربرداری صورت بگیرد. آهنگ تصویربرداری به معنی تعداد تصاویر دریافتی در ثانیه است. آهنگ ۳۰ تصویر بر ثانیه (fps) برای اکثر دوربین‌های ویدئویی مناسب است. همچنین، عمق میدان عبارت است از گستردگی محدوده‌ای که جلوتر یا عقب‌تر از سوژه اصلی به‌طور واضح دیده می‌شود.

تعداد پیکسل‌ها بر وضوح فضایی اثر می‌گذارد و طیفی از مقدار

3. Photo Detector
4. Charge-Coupled Device (CCD)
5. Dark Current Noise
6. Readout Noise
7. Dark Frame
8. Flat Field
9. Metal Oxide Semiconductor Capacitors

فرابنفش یا مرئی به‌طور گزینشی به‌کار گرفته می‌شوند. این پالایه‌ها یا صافی‌ها نوسانات تصادفی نیم‌رخ شدت پرتو لیزر را حذف می‌کنند و باعث دقت می‌شوند. یک پرتو لیزر آرمانی منسجم چنان رفتار می‌کند، که گویی توسط یک منبع نقطه‌ای تولید شده است. در بعضی پالایه‌ها از یک سوراخ هم برای دفع تمام نوفه‌ها استفاده می‌شود (شکل (۷)) [۲۵]



شکل ۷. پالایه نوری [۲۶]

در ترکیب با یک منبع نوری، پالایه تحریک تنها نوری را که برای برانگیختگی نمونه موردنظر مناسب است عبور می‌دهد و بقیه طول موج‌ها را مسدود می‌کند؛ مخصوصاً آن‌ها که در طیف گسیلی‌اند. ممکن است نورهای هرزی مانند پراکندگی ریلی و رامان هم از نمونه تابیده شود. علاوه بر این، امکان وجود نوفه زمینه که از نمونه عبور نکرده نیز وجود دارد. این پالایه چنین نورهایی را مسدود می‌کند و تنها به طول موج مربوط به گسیل فلوئورسانسی نمونه اجازه عبور می‌دهد.

۴.۱.۳. سلول یا محفظه نمونه

سلول، نمونه مورد نظر را نگهداری می‌کند. جنس محفظه باید طوری باشد که به نور گسیلنده و جذبی اجازه عبور دهد. همچنین، اندازه یاخته بر اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد. هرچه طول مسیر (یا قطر) سلول بیشتر باشد، غلظت کمتری می‌تواند خوانده شود؛ زیرا پرتو گسیلی باید طول مسیر طولانی‌تری برای خروج از یاخته طی کند. یاخته علاوه بر پلاستیک‌های مختلف که می‌توانند طول موج خاصی از نور را عبور دهند، از بوروسیلیکات^۱ یا شیشه کوارتز^۲ هم ساخته می‌شود.

1. Borosilicate
2. Quartz glass

۲.۴ پردازش تصویر

تصاویر خام فلئورسانی القایی با لیزر صفحه ای که توسط دوربین دریافت شده است، باید برای تصحیح خطا و مدرج سازی پردازش شوند. یکی از انواع پردازش تصویر شامل استفاده از تصویر زمینه با غلظت مشخص و یکنواخت برای تعیین ثابتهای $\alpha(i, j)$ است که در معادله (۲۴) تعریف شده است. غلظت زمینه در مدت زمان آزمایش اصلی هم حضور دارد.

غلظت رنگدانه موجود در تصویر m به صورت $c_n(i, j) = c_n(i, j) + b_n$ تجزیه می شود که b_n غلظت زمینه یکنواخت حاضر در زمانی است که تصویر دریافت شده و $c_n(i, j)$ ساختار غلظتی غیر از زمینه (نتیجه مطلوب) است. ضریب تضعیف در معادله (۲۲) به صورت $a(r, \theta) = a_c(r, \theta)a_b(r)$ درمی آید، که a_c و a_b ، به ترتیب، تضعیف محلی به دلیل b_n و c_n است. شدت فلئورسانی (معادله (۲۳)) در تصویری تنها شامل زمینه یکنواخت عبارت است از [۳]:

$$B_n(i, j) = \alpha(i, j)a_b(r)b_n + D(i, j) \quad (25)$$

که $D(i, j)$ جریان تاریک دوربین است. این جریان می تواند به طور میانگین تعدادی از تصاویر دریافتی توسط دوربین با عدسی بسته در دمای عملیاتی به دست آید. وقتی رنگدانه علاوه بر زمینه وجود داشته باشد، شدت فلئورسانی ثبت شده در تصویر m عبارت خواهد بود از:

$$I_n(i, j) = \alpha(i, j)a_c(r, \theta)a_b(r)[c_n(i, j) + b_n] + D(i, j) \quad (26)$$

معادله های (۲۵) و (۲۶) می توانند برای برخورداری از عبارتی برحسب $c_n(i, j)$ ترکیب شوند. این رابطه جدید شامل پارامتر $\alpha(i, j)$ نیست:

$$c_n(i, j) = \frac{b_n}{a_c(r, \theta)} \frac{I_n(i, j) - [a_c(r)(B_n(i, j) - D(i, j)) + D(i, j)]}{B_n(i, j) - D(i, j)} \quad (27)$$

معمولاً به ازای $I_n \geq (B_n - D)$ معادله (۲۷) به صورت معادله (۲۸) تقریب زده می شود.

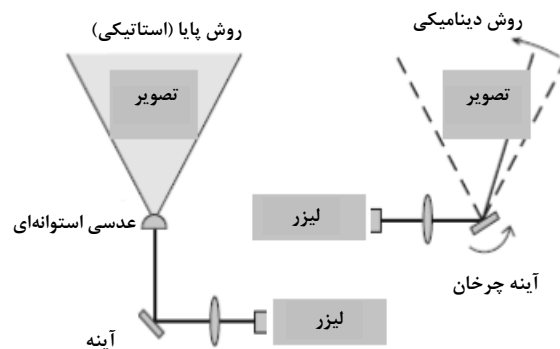
$$c_n(i, j) \approx \frac{b_n}{a_c(r, \theta)} \frac{I_n(i, j) - B_n(i, j)}{B_n(i, j) - D(i, j)} \quad (28)$$

کم 200×200 [۱۳] تا مقدار زیاد 1728×14 [۱۴] را دربر می گیرد. یک دوربین دیجیتال با عمق میدان N ، حداکثر می تواند 2^N بسته سیاه و سفید گسسته تعیین کند. اکثر آزمایش های صفحه ای از دوربین های ۸ بیت استفاده می کنند [۱۲]، اما دوربین های ۱۰ بیت [۲۱] و ۱۲ بیت هم برای دریافت طیف دینامیکی بیشتری از غلظت در سیستم به کار رفته اند [۲۷].

در کاربردهای فلئورسانی القایی با لیزر صفحه ای با سرعت بالا، آهنگ تصویربرداری به بزرگی ۹۵۵ تصویر بر ثانیه به کار گرفته می شود. ملاحظه آخر، حساسیت طیفی دوربین است. حساسیت تراشه CCD در طول موج فلئورسانی بر روی زمان در معرض قرارگیری مورد نیاز برای یک تصویر مشخص تأثیر می گذارد [۳].

۴.۱.۵ ابزارهای صفحه ای

ابزارهای نوری تشکیل دهنده صفحه برای تبدیل پرتو لیزر به یک صفحه در داخل جریان به کار گرفته می شوند. متداولترین روش (شکل (۸)) برای تشکیل یک صفحه لیزری، به کارگیری عدسی استوانه ای است. آرکومانیس و همکاران [۲۸] در سال ۱۹۹۰ از عدسی استوانه ای برای تشکیل صفحه در جریان با سه رنگدانه مختلف به منظور ارزیابی مشخصات رنگدانه های فلئورسانی مختلف استفاده کردند. روش دوم (شکل (۸)) به کارگیری یک آینه چرخان برای روبش سریع پرتو تابشی یک یا چندین بار روی مساحت تصویر است [۱۲]. در مواردی، یک چندضلعی چرخان با آینه هایی روی هر سطح به سرعت می چرخد، به طوری که هر سطح یک روبش لیزری ایجاد می کند [۳].



شکل ۸. تشکیل صفحه با استفاده از عدسی استوانه ای و آینه چرخان [۳]

G و G_0 آرایه‌های پیکسلی متناظر با توزیع شدت گسیلی دیجیتالی شده، به ترتیب، برای میدان غلظت مطلوب و میدان غلظت یکنواخت و g مشخصه فیلم و پردازش آن است. مقدار g از تصاویر رنگدانه توزیع شده به‌طور یکنواخت، هر تصویر در یک غلظت یکنواخت متفاوت تعیین می‌شود. چون سطح نوردهی (توسط صفحه لیزری) با مکان تغییر می‌کند، غلظت متوسط روی سه مساحت بر روی فیلم به‌دست آمده و رسم شده است. شیب داده‌ها در قسمت خطی سه ناحیه یکسان و برابر 0.58 است.

دنی و همکاران [۱۷] آزمایشی برای تعیین غلظت اکسیژن در فاز مایع انجام داد. این اندازه‌گیری براساس تخریب شیمیایی رنگدانه فلوروسانی موجود در محیط توسط اکسیژن صورت می‌گیرد. آنها از رابطه زیر برای محاسبه غلظت در هر پیکسل دوربین استفاده کردند (جدول (۲)-۱۳).

$$[O_2](i, j, t) = \frac{1}{K_{SV}} \left(\frac{1}{GV^*} - 1 \right) \quad (31)$$

در این رابطه $[O_2](i, j, t)$ میدان غلظت اکسیژن در هر پیکسل، K_{SV} ثابت استرن-ولمر^۱ است که از نمودار مدرج‌سازی محاسبه می‌شود و مقدار آن در این آزمایش عبارت است از $K_{SV} = 0.395$ و GV^* شدت پیکسل تصحیح شده است که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$GV^* = \frac{GV(i, j, t) - \bar{GV}_{bn}(i, j) \bar{E}(t)}{\bar{GV}_{ref}(i, j) - \bar{GV}_{bn}(i, j) E(t)} \quad (32)$$

اگر $GV(i, j, t)$ شدت یک پیکسل در مختصات i و j یک تصویر تصحیح‌نشده در زمان t باشد، مقدار نوبه زمین از تصویری به تصویر دیگر تغییر می‌کند. ماتریسی از $\bar{GV}_{bn}(i, j)$ با متوسط‌گیری از 50 تصویر به‌دست می‌آید. این تصویر زمینه به‌طور خودبه‌خود از تصویر اصلی کم می‌شود.

تصویر حاصل از محلولی با غلظت ثابت اکسیژن $[O_2] = 0 \text{ gL}^{-1}$ بیانگر اختلاف شدت در مکان‌های مختلف با وجود غلظت ثابت اکسیژن است. این پدیده به دلیل نایکنواختی توزیع مکانی شدت نور تحریک روی صفحه لیزری است.

ابتدا با محاسبه $(I_n - B_n)/(B_n - D)$ نوبه ناشی از نور زمینه و جریان تاریک دوربین تصحیح و سپس با ضرب کردن عبارت در b_n به واحد غلظت تبدیل، و تصویر حاصل برای تصحیح خطای ناشی از تضعیف پرتو تحریک بر $\alpha_c(r, \theta)$ تقسیم می‌شود. در معادله (۲۸)، غلظت رنگدانه در تصویر زمینه b_n باید از قبل معین باشد. به این ترتیب، با حذف دو نوبه ناشی از نور زمینه و جریان تاریک دوربین و تصحیح خطای ناشی از تضعیف پرتو تحریک شدت فلوروسانی، تصویر m م در یک پیکسل معین مدرج می‌شود و می‌توان غلظت موردنظر را در تصویر m م محاسبه کرد.

برای تعیین $\alpha(x_i, y_i)$ که ثابتی برای درنظر گرفتن همه آثار هندسی مربوط به ابزارهای به‌کار رفته است، می‌توان روابط متفاوتی با توجه به سیستم مورد استفاده به‌کار برد. در ادامه، چند نمونه از کارهای پژوهشگران به‌همراه روابط استفاده شده بیان خواهد شد. هوکین و همکاران [۱۲] از رابطه زیر برای تعیین غلظت لحظه‌ای ردیاب پیکسل (i, j) استفاده کردند (جدول (۲)-۵):

$$C(i, j, t) = \frac{G(i, j, t) - \bar{G}_B(i, j)}{\bar{G}_{Chom}(i, j) - \bar{G}_B(i, j)} C_{Chom} \quad (29)$$

این آزمایش برای بررسی میدان غلظت در یک مخزن همزده با مقیاس بزرگ انجام شده است. برای محاسبه پارامترهای این رابطه، ابتدا تعداد کافی از تصاویر از تانک همزده پر شده با آب برای به‌دست آوردن میدان متوسط شدت زمینه $\bar{G}_B(x_i, y_i)$ دریافت می‌شود. سپس مخزن همزده با محلول ردیاب فلوروسانی با غلظت معین و یکنواخت $C_{Chom}(x_i, y_i)$ پر شد و میدان شدت $\bar{G}_{Chom}(x_i, y_i)$ گسیل فلوروسانی متناظر با این غلظت به‌دست می‌آید. سرانجام، برای بررسی مخلوط دو جریان ورودی، یکی شامل آب خالص و دیگری شامل ردیاب فلوروسانی تعداد زیادی تصویر که مشخص‌کننده حالت لحظه‌ای اختلاط است، ثبت می‌شود.

شلین [۱۴] از رابطه دیگری برای محاسبه غلظت در ناحیه کوچکی از سیال آشفته (جت) استفاده کرد. (جدول (۲)-۳):

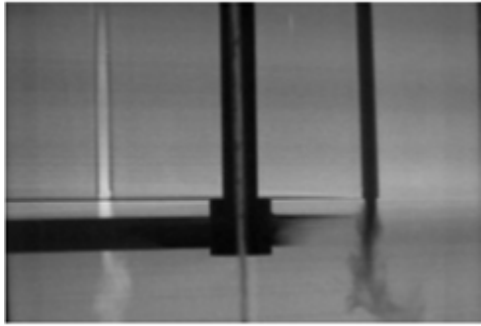
$$C(i, j) = C_0 [G_0(i, j) / G(i, j)]^{1/g} \quad (30)$$

در این رابطه C_0 مقدار غلظت رنگدانه توزیع شده به‌طور یکنواخت،

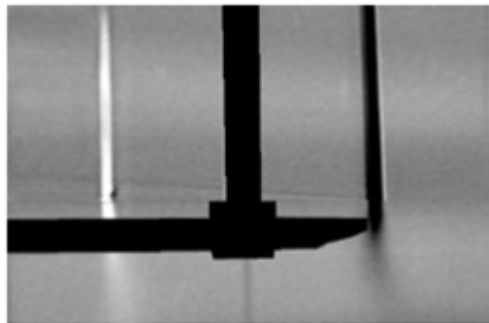
1. Stern-Volmer

$$N_{ppm,abs} = \left(\frac{T}{T_C}\right) \cdot \left(\frac{f_B(T_C)}{f_B(T)}\right) \cdot N_{ppm,Re} \quad (36)$$

در این رابطه، T دمای شعله، T_C دمای شعله مدرج شده، f_B ثابت بولتزمن و $N_{ppm,Re}$ غلظت NO نسبی است که از روش فلوتورسانی القایی به کمک لیزر اشباع (LSF) به دست آمده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف) تصویر خام؛ (ب) تصویر پردازش یافته در کار هوکین و همکاران [۱۲]

نمونه‌ای از تصاویر خام و پردازش شده به کمک این روش در کار هوکین و همکاران [۱۲] در شکل (۹) مشاهده می‌شود. در شکل (۹-الف) یک تصویر خام از ناحیه مورد بررسی مشاهده می‌شود که همزن در آن جای گرفته است. همچنین، دو جت سیال ورودی که یکی آب (سمت راست) و دیگری محلول رودامین B (سمت چپ) است، نیز در تصویر دیده می‌شود. در شکل (۹-ب) تصویر خام به منظور دستیابی به غلظت کاهش یافته که به کمک رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود، پردازش شده است. همانطور که دیده می‌شود، روشن‌ترین نقاط مربوط به ورودی محلول رودامین B بوده و هرچه غلظت رنگدانه در محیط کمتر شده نقاط به صورت

$\overline{GV}_{ref}(x, z)$ در غلظت ثابت اکسیژن به صورت پیکسل به پیکسل حاصل می‌شود. با ترسیم منحنی تغییرات انرژی پالس لیزر بر حسب زمان، دیده می‌شود که شدت پالس با زمان کمی تغییر می‌کند بنابراین، در این رابطه $E(t)$ انرژی لحظه‌ای دریافتی از لیزر در زمان t و $\bar{E}(t)$ متوسط زمانی انرژی لیزر ثبت شده برای تصاویر مرجع است.

ماتسوموتو [۲۷] میدان غلظت یک جزء را در جریان‌های مایع در ریزکانال بررسی کردند. آنها رابطه زیر را برای محاسبه میدان غلظت به کار بردند. (جدول (۲-۱۱))

$$C(i, j) = -\frac{1}{C_2} \ln \{1 - G(i, j) + G(i, j) \exp[-C_2 c_{sat}]\} \quad (33)$$

در این رابطه دو ثابت نامعین C_2 و c_{sat} وجود دارد که با انجام روش حداقل مربعات روی داده‌های آزمایشگاهی به صورت $C_2 = 51 \text{ g/L}$ و $c_{sat} = 0.23 \text{ g/L}$ برای تعیین میدان شدت فلوتورسانی بهنجار شده:

$$G_i(i, j) = \frac{I_i(i, j) - I_{min}(i, j)}{I_{max}(i, j) - I_{min}(i, j)} \quad (34)$$

از تعدادی محلول با غلظت معین رودامین B در آب مقطر با مقادیر $C_{max} = 0.35 \text{ g/L}$ و $C_{min} = 0$ تا $C_i = 0.28$ تا 0.07 g/L استفاده می‌شود. برای هر غلظت C_i یک تصویر $I_i(x, y)$ به دست می‌آید. در مقادیر حدی غلظت C_{max} و C_{min} معمولاً پانزده تصویر دریافت شده و میدان شدت متوسط‌گیری شده، $\bar{I}_{max}(x, y)$ و $\bar{I}_{min}(x, y)$ محاسبه می‌شوند. این عمل به حذف نوسانات زمانی لیزر و آشفتگی پیکسل کمک می‌کند.

درودچی و همکاران [۲۴] از رابطه زیر برای بررسی اختلاط مایع-مایع را در یک بستر میکرو استفاده کردند (جدول (۲-۱۴)):

$$C^* = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (35)$$

در این رابطه I_{max} حداکثر شدت نور در خروجی نازل، I_{min} حداقل شدت و I شدت هر پیکسل است.

لی و همکاران [۱۸] برای اندازه‌گیری غلظت NO در شعله مخلوط هوا و CH_4 رابطه زیر را به کار بردند (جدول (۲-۱۵)):

تیره‌تری درآمده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مصورسازی جریان با به‌کارگیری روش فلئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای بررسی شد. روش فلئورسانس القایی با لیزر صفحه‌ای به دلیل تصویربرداری لحظه‌ای و غیرتداخلی به کمک صفحه لیزری از غلظت اجزا در تمام نقاط جریان در جریان‌های مایع و گازی موردتوجه است. جریان به‌کمک صفحه لیزری روشن شده و تصاویر با گسیل فلئورسانسی توسط مولکول‌های رنگدانه موجود در جریان تشکیل می‌شوند. این تصاویر روی یک تراشه CCD ضبط شده و با استفاده از فرایند پردازش تصویر دیجیتالی و به صورت میدان غلظت لحظه‌ای تفسیر می‌شوند.

$$\xi_{\bar{A}}(i,j) = \frac{\bar{C}(i,j)}{\bar{C}_{A0}} \quad (37)$$

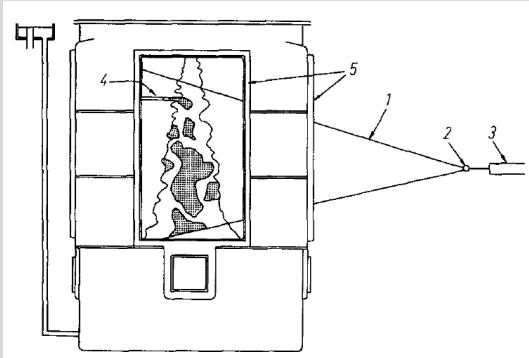
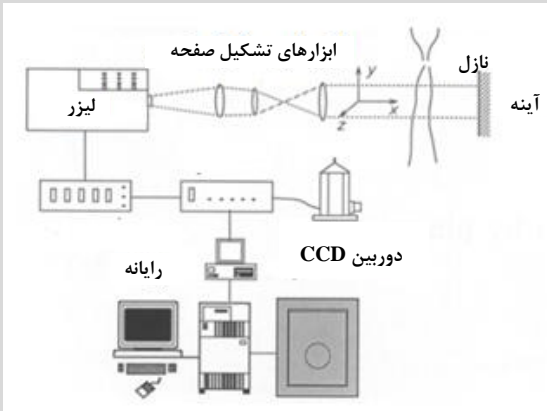
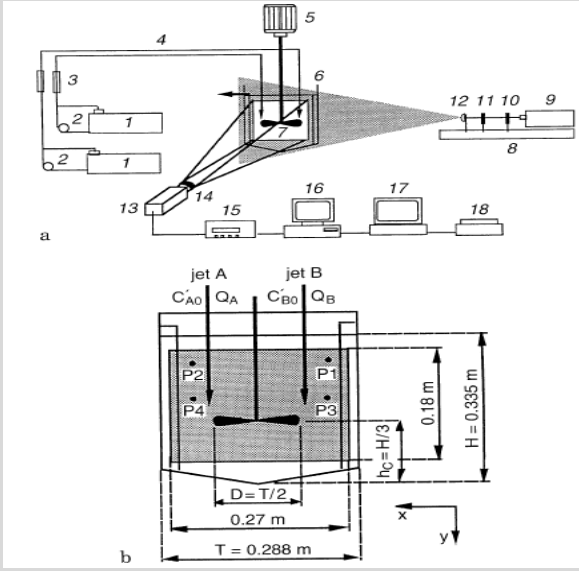
غلظت کاهش یافته بیانگر احتمال قرار گرفتن مولکولهای این جریان ورودی در یک پیکسل معین است. در این رابطه \bar{C} متوسط 300 میدان غلظت لحظه‌ای و \bar{C}_{A0} غلظت ردیاب در جریان ورودی A است.

در جدول (۲)، نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده فلئورسانسی القایی با لیزر صفحه‌ای توسط پژوهشگران مختلف به صورت خلاصه آورده شده است.

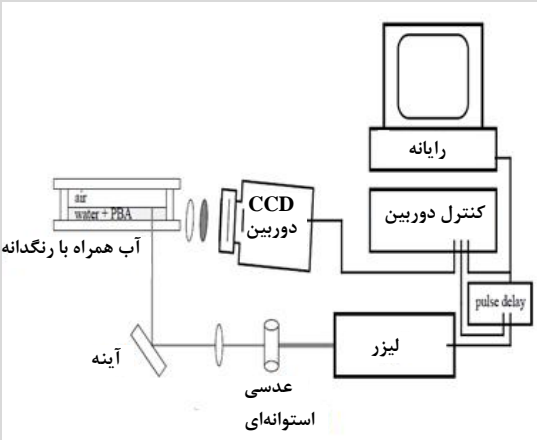
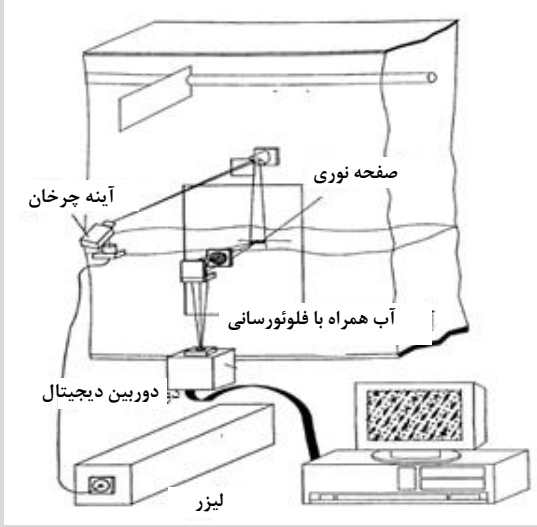
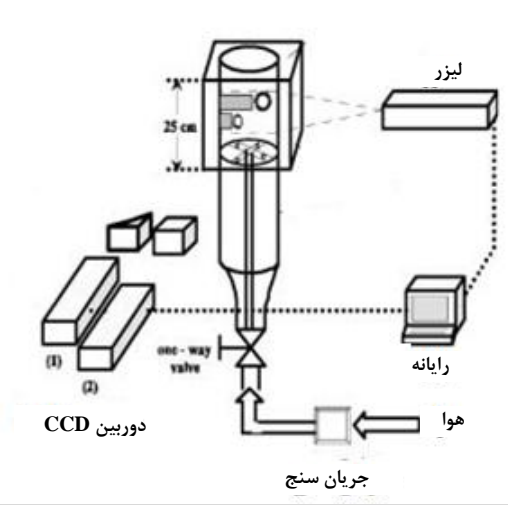
جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات

مشخصات	سامانه آزمایشگاهی	محققان	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری غلظت در جریان مایع - لیزر آرگونی - رنگدانه فلئورسانسی 		<p>واکر [۲] [۱۹۸۷]</p>	۱
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - بررسی رفتار فلئورسنسی محلول - رودامین 6G غلیظ - لامپ تنگستن - رنگدانه رودامین 6G 		<p>پنزکوفر و همکاران [۲۲] [۱۹۸۷]</p>	۲

جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات (ادامه)

ردیف	محققان	سامانه آزمایشگاهی	مشخصات
۳	شلین [۱۹۸۸] [۱۴]		<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت در یک جت آشفته - لیزر آرگون - رنگدانه رودامین B
۴	کرونینجن و همکاران [۱۹۹۰] [۲۱]		<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت در یک جت آشفته - لیزر Xef-excimer - رنگدانه Biacetyl
۵	هوکین و همکاران [۱۹۹۶] [۱۲]		<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - بررسی میدان غلظت در یک مخزن همزده - لیزر آرگون - رنگدانه رودامین B

(ادامه) جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات

مشخصات	سامانه آزمایشگاهی	محققان	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت ناشی از جذب اکسیژن در فصل مشترک - لیزر نیتروژن - رنگدانه PBA 		<p>دوک و همکاران [۱۹۹۶][۲۳]</p>	۶
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت در لایه مرزی جرمی - لیزر آرگون - رنگدانه فلئورسانتی 		<p>مانسترر و همکاران [۱۹۹۸][۲۹]</p>	۷
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت در جریان حبایی گاز-مایع - لیزر Nd:YAG - رنگدانه Rh 610, LDS 698 		<p>مقدس و همکاران [۲۰۰۲][۱۶]</p>	۸

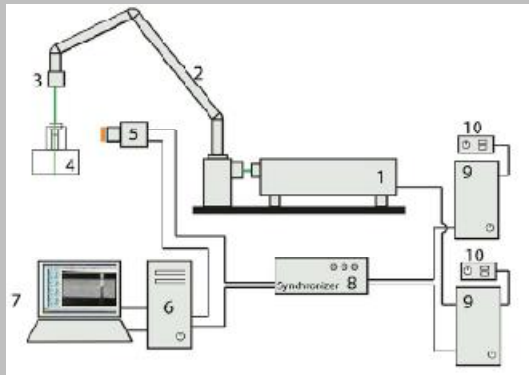
(ادامه) جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات

مشخصات	سامانه آزمایشگاهی	محققان	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - به‌دست آوردن معیاری مناسب برای فلئورسانی القایی با لیزر - صفحه ای با به‌کارگیری لیزر پرتوان - لیزر Nd:YAG - رنگدانه رودامین WT 		ملتون و همکاران [۲۰۰۳] [۱۵]	۹
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت در جریان مایع با استفاده از لیزر پالسی - لیزر Nd:YAG - رنگدانه رودامین 6G 		شان و همکاران [۲۰۰۴] [۳۰]	۱۰
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری میدان غلظت یک جز در جریان مایع در میکروکانال - لیزر آرگونی - رنگدانه رودامین B 		ماتسوموتو و همکاران [۲۰۰۵] [۲۷]	۱۱
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - بررسی تاثیر تخریب فوتوشیمیایی روی فلئورسانی القایی با لیزر - صفحاتی - لیزر آرگون - رنگدانه فلئورسانی و رودامین 6G 		لارسن و همکاران [۲۰۰۶] [۵]	۱۲

(ادامه) جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات

مشخصات	سامانه آزمایشگاهی	محققان	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری محلی انتقال اکسیژن - حول یک حباب - لیزر Nd:YAG - رنگدانه Ruthenium complex 		دنی و همکاران [۲۰۰۷] [۱۷]	۱۳
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - بررسی اختلاط مایع- مایع در یک بستر میکرو - منبع نوری LED - رنگدانه محلول سدیم یدید 		درودچی و همکاران [۲۰۱۲] [۲۴]	۱۴
<ul style="list-style-type: none"> - دو بعدی - اندازه‌گیری غلظت NO در یک شعله مخلوط هوا و CH4 - لیزر Nd:YAG - رنگدانه NO 		لی و همکاران [۲۰۱۳] [۱۸]	۱۵
<ul style="list-style-type: none"> - دوبعدی - اندازه‌گیری غلظت رادیکال هیدروکسیل (OH) در یک جت پلاسما - لیزر Nd:YAG - رنگدانه OH 		وراک و همکاران [۲۰۱۳] [۱۹]	۱۶

جدول ۲. نمونه‌هایی از مطالعات (ادامه)

مشخصات	سامانه آزمایشگاهی	محققان	ردیف
<ul style="list-style-type: none"> - دو بعدی - بررسی تاثیر عدد رینولدز و نابرابری دو جریان بر اختلاط در یک جت تماسی - لیزر Nd-YAG - رنگدانه رودامین 6G 		فونت و همکاران [۲۰][۲۰۱۵]	۱۷

مراجع

- [1] Valeur, B., Molecular Fluorescence Principles and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH, 3-527-60024-8, Weinheim, 3, (2001).
- [2] Walker, D. A., "A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids", IOP science, J. Phys. E: Sci. Instrum. 20, 217-224, (1987).
- [3] Crimaldi, J. P., "Planar laser induced fluorescence in aqueous flows", Exp Fluids, 44, 851-863, (2008).
- [4] Yokomae, T., planar laser-induced fluorescence (PLIF), Msc, thesis, the university of texas, Arlington, (2003).
- [5] Haugland, R. P., Spectra of Fluorescent Dyes Used in Flow Cytometry, Meth Cell Biol, 42, 641-663, (1994).
- [6] Larsen, L. G., Crimaldi, J. P., "The effect of photobleaching on PLIF", Exp Fluids, 41, 803-812, (2006).
- [7] Duarte, F. J., Hillaman, L. W. (Eds.), Dye Laser Principles with applications, Academic Press, Boston, 210, (1990).
- [8] Casey, Kelly G., Quitevis, E., L., "Effect of solvent polarity on non radiative processes in xanthene dyes: Rhodamine B in normal alcohols", The Journal of Physical Chemistry, 92, 6590-6594, (1988).
- [9] Albani, J. R., Principles and Applications of Fluorescence Spectroscopy, Blackwell Science, Malaysia, 88-92, (2007).
- [10] Visscher, K., brakenhoff, G. J., Visser, T. D., "Fluorescence saturation in confocal microscopy", journal of Microscopy, Vol. 175. Pt 2, 162-165, (1994).
- [11] Prasad, A. K., "Particle image velocimetry", current science, Vol. 79, NO. 1, 51, (2000).
- [12] Houcine, I., Vivier, H., Plasari, E., David, R., Villermaux, J., "Planar laser induced fluorescence technique for measurements of concentration fields in continuous stirred tank reactors", Experiments in Fluids 22, 95-102, (1996).
- [13] Larsen, L. G., Crimaldi, J. P., "The effect of photobleaching on PLIF", Exp Fluids 41, 803-812, (2006).
- [14] Shlien, D. J., "Instantaneous concentration field measurement technique from flow visualization photographs", Experiments in fluids 6, 541-546, (1988)
- [15] Melton, L. A., Lipp, C. W., "Criteria for quantitative PLIF experiments using high-power lasers", Experiments in Fluids 35, 310-316, (2003).
- [16] Moghaddas, J. S., Tragardh, C., Kovacs, T., Ostergren, K., "A new method for measuring concentration of a fluorescent tracer in bubbly gas-liquid flows", Experiments in Fluids 32, 728-729, (2002).
- [17] Dani, A., Guiraud, P., Cockx, A., "Local measurement of oxygen around a single bubble by planar laser-induced fluorescence", Chemical Engineering Science 62, 7245-7252, (2007).
- [18] Li, B., He, Y., Li, Z., Konnov, A. A., "Measurements of NO concentration in NH₃-doped CH₄ + air flames using saturated laser-induced fluorescence and probe sampling", Combustion and Flame 160, 40-46, (2013).
- [19] Vorac, J., Dvorak, P., Prochazka, V., Ehlbeck, J., Reuter, S., "Measurement of hydroxyl radical (OH) concentration in an argon RF plasma jet by laser-induced fluorescence", Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 22, issue 2, 1-9, (2013)
- [20] Fonte, C. P., Sultan, M. A., Santos, R. J., Dias, M. M., Lopes, J. C. B., "Flow imbalance and Reynolds number impact on mixing in Confined Impinging Jets", Chemical Engineering Journal 260, 316-330, (2015).

- [21] VanCruyningen, I., Lozano, A., Hanson, R. K., "quantitative imaging of concentration by planar laser-induced fluorescence", *Experiments in fluids* 10, 41-49, (1990).
- [22] Penzkofer, A., Leupacher, W., "Fluorescence behavior of highly concentrated rhodamine 6G solutions", *Journal of Luminescence* 37, 61-72, (1987).
- [23] Duke, S. R., Hanratty, T. J., "Measurement of the Concentration Field Resulting from Oxygen Absorption at a Wavy Air-Water Interface", *Air-Water Gas Transfer*, 627-635, (1993).
- [24] Doroodchi, E., Sathe, M., Boyes, A., Evans, G., Moghtaderi, B., "liquid-liquid mixing using microfluidised beds", 14th European Conference on Mixing, Warszawa, 10-13, (2012).
- [25] Lakowicz, J. R., *Topic in Fluorescence Spectroscopy*, Kluwer Academic Publishers, volume 1, ed 4, Boston, 28-45, (2002).
- [26] Webb, C. E., Jones, J. D. C., *Handbook of laser technology and applications*, IOP Publishing, 200, Vol 1, ed 4, 1200-1210, (2004).
- [27] Matsumoto, R., "Quantitative measurement of depth-averaged concentration fields in microchannels by means of a fluorescence intensity method", *Experiments in Fluids* 39, 722-729, (2005).
- [28] Arcoumanis, C., McQuirk, J. J., Palma J. M., "On the use of fluorescence dyes for concentration measurements in water flows", *Experiments in Fluids* 10, 177-180, (1990).
- [29] Munsterer, T., Jahne, B., "PLIF measurements of concentration profiles in the aqueous mass boundary layer", *Experiments in Fluids* 25, 190-196, (1998).
- [30] Shan, J. W., Lang, D. B., Dimotakis, P. E. " Scalar concentration measurements in liquid-phase flows with pulsed lasers", *Experiments in Fluids* 36, 268-273, (2004).