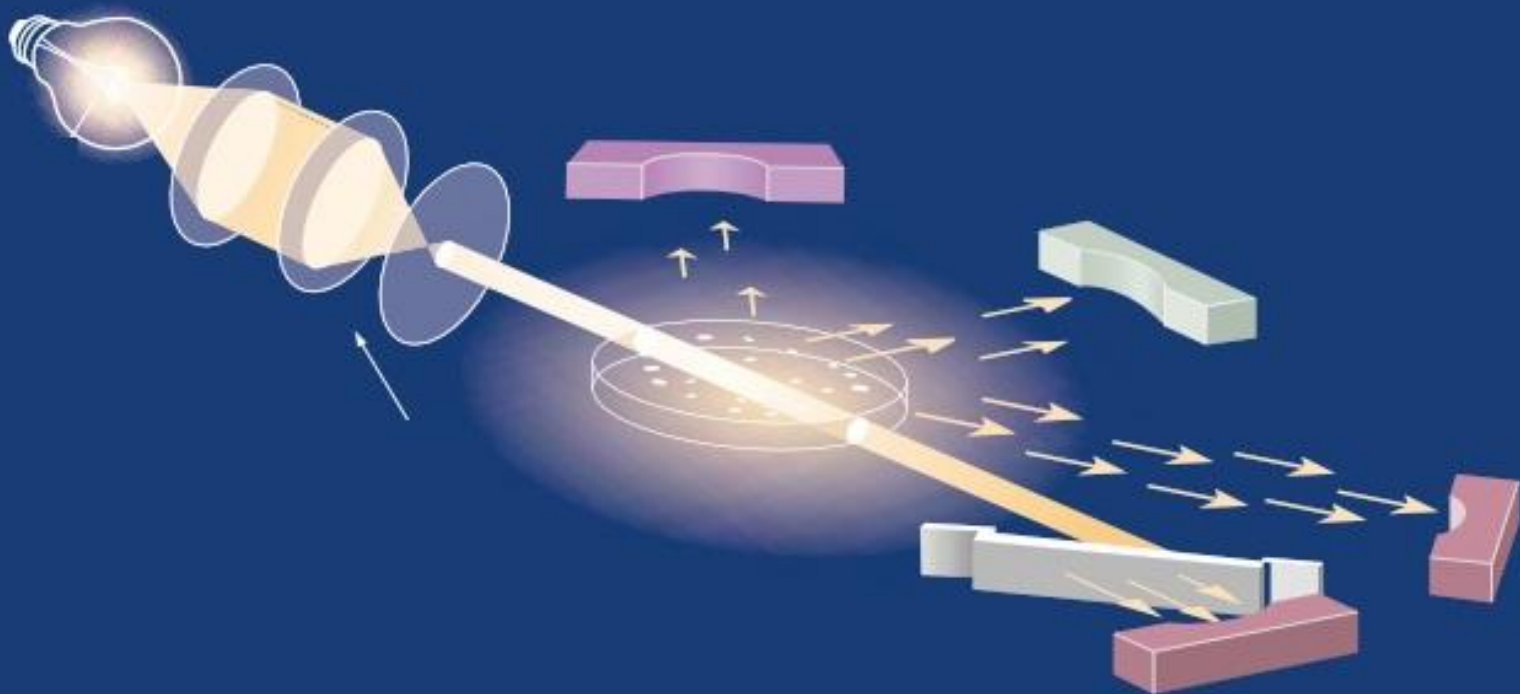
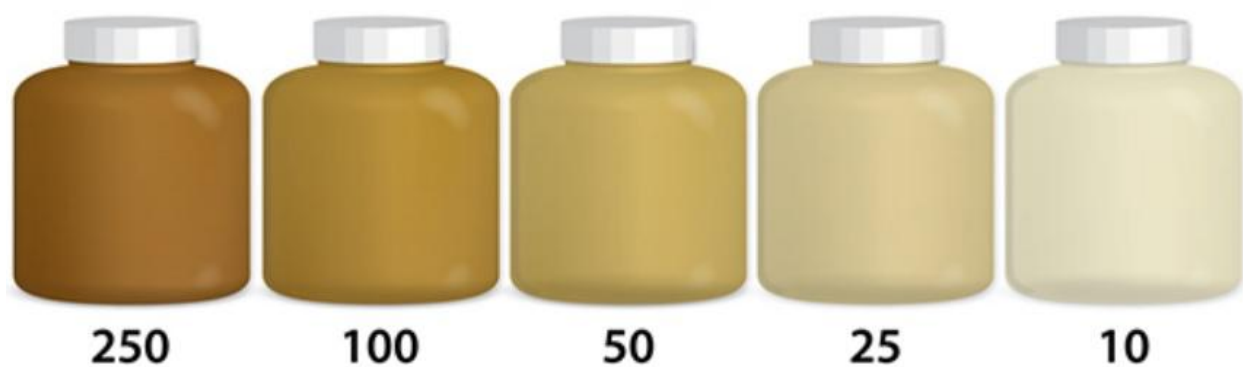


اصول بنیانی و مفاهیم اساسی کدورت سنجی



Turbidity (NTU)

Water Samples:



از انتشارات گروه پشتیبانی علمی و آموزشی شرکت خردکيا دانا

پاییز ۱۴۰۰

مقدمه و تعریف

یکی از فاکتورهای مهم بیانگر کیفیت آب، پارامتری است که به حضور ذرات جامد معلق و پخش شده، اعم از گل و لای، خاک رس، ماسه، جلبک، میکروارگانیسم ها، مواد آلی و معدنی می پردازد. اثرات جانبی حضور و یا افزایش و کاهش مقدار این مواد در همه آبها و صنایع یکسان نیست بعنوان مثال در برجهای خنک کننده، وجود چنین املاحی، حتی در غلظت های بالاتر مشکل چندان حادی ایجاد نمی کند در حالیکه در بویلرهای تحت فشار امروزی، آب تقریباً باید عاری از هر نوع ناخالصی باشد.

در آب شرب وجود ذرت جامد، به رشد میکروارگانیسم های خطرناک آب، و همچنین کاهش اثر مواد ضدعفونی کننده، کمک شایانی می نماید. بنابراین وجود چنین املاحی در آب شرب خطر بالقوه ای تلقی می گردد. به هر حال می توان به صورت کلی چنین عنوان نمود که در همه قسمت های مختلف آب، وجود املاح معلق، کمابیش مشکل زا می باشد.

چنانچه به نمونه ای که حاوی املاح معلق می باشد نوری تابیده شود، نور تابیده شده، به جای عبور مستقیم از درون آب، با ذرات برخورد نموده و متفرق یا به اصطلاح پخش و پلا می شود (Scattering). به این خاصیت، کدورت آب گفته می شود. این تعریفی است که انجمن بهداشت عمومی آمریکا (APHA) برای کدورت آب ارائه نموده است. به عبارتی کدورت مفهوم مقابل زلالت و شفافیت آب را دارد. کدورت به مفهوم اندازه گیری مستقیم غلظت یا مقدار ذرات معلق در آب نیست بلکه کمیتی است که به صورت غیرمستقیم و با اندازه گیری نور پخش شده درون آب، معیاری کلی از وجود چنین ذرات را ارائه می نماید.

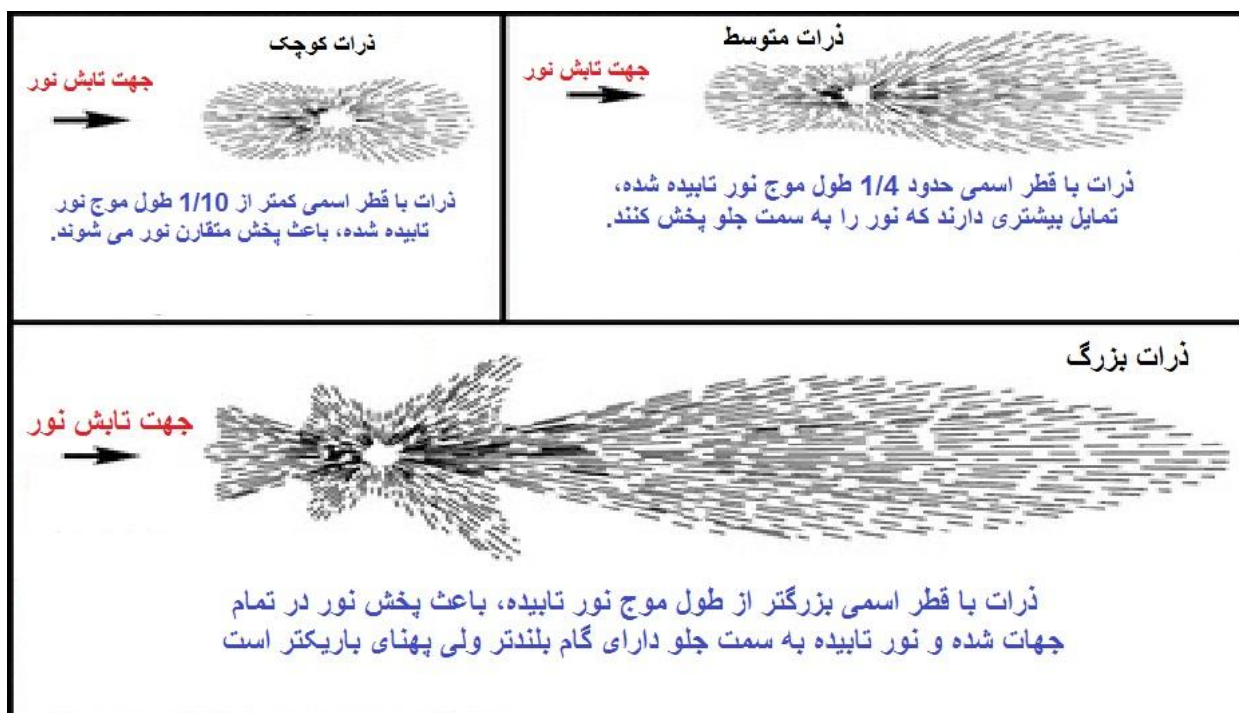
در این مقاله سعی گردیده که مفاهیم اساسی کدورت سنجی تشریح گردیده و اصول بنیانی روش های کدورت سنجی بیان گردند. همچنین به ذکر عوامل موثر بر دقت کدورت سنجی خواهیم پرداخت و در ادامه، دستورالعمل های سازمان های وضع کننده استانداردهای کدورت سنجی توضیح داده خواهند شد.

تئوری پخش نور

بطور کاملاً خلاصه می توان کدورت را بر هم کنش بین نور و املاح معلق درون آب دانست. وقتی اشعه نوری از آب کاملاً خالص (با مفهوم تئوریک) عبور نماید هیچ اثری نباید روی اشعه نور حادث گردد. در هر حال این موضوعی تئوریک بوده و حتی مولکولهای آب نیز تا حد خیلی کمی سبب تفرق نور می گردند. بنابراین عملاً نمی توان هیچ محلولی با کدورت صفر مطلق یافت. در محلول های واقعی نظیر آب، میزان پخش نور به اندازه ذرات، شکل و ترکیب آنها درون آب بستگی دارد. همچنین رنگ نور (یا طول موج نور تابیده) نیز در این خصوص موثر است.

وقتی ذره کوچکی، در مسیر نور تابیده شده درون آب قرار می گیرد با حذب بخشی از نور، خود بعنوان یک منبع تابش عمل نموده و نور را مجدداً در تمام جهات پخش می نماید. میزان و نحوه باز پخش نور توسط ذرات به نسبت بین اندازه ذره و طول موج نور تابیده بستگی دارد.

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است ذراتی که اندازه اسمی آنها بسیار کمتر از طول موج نور تابیده شده است باعث می شوند که نور بصورت کاملاً متقارن پخش گردد بطوریکه میزان پخش نور به سمت جلو (در مسیر حرکت نور) با میزان پخش نور به سمت عقب (خلاف جهت نور تابیده شده) تقریباً یکسان است. هر چه اندازه ذره نسبت به طول موج نور تابیده شده بزرگتر شود، بازپخش نور توسط نقاط مختلف یک ذره، باعث کاهش همگونی و هارمونی در پخش نور در جهات مختلف می گردد اما بصورت کلی می توان گفت که هر چه اندازه ذره بزرگتر می شود تمایل به پخش نور به سمت جلو بیشتر می گردد. همچنین ذرات کوچکتر، نور با طول موج کمتر (رنگ آبی) را به مراتب با شدت بیشتری نسبت به نور با طول موج بلندتر (رنگ قرمز) پخش می نمایند و این موضوع برای ذرات بزرگتر بصورت عکس این قضیه جلوه می نماید.

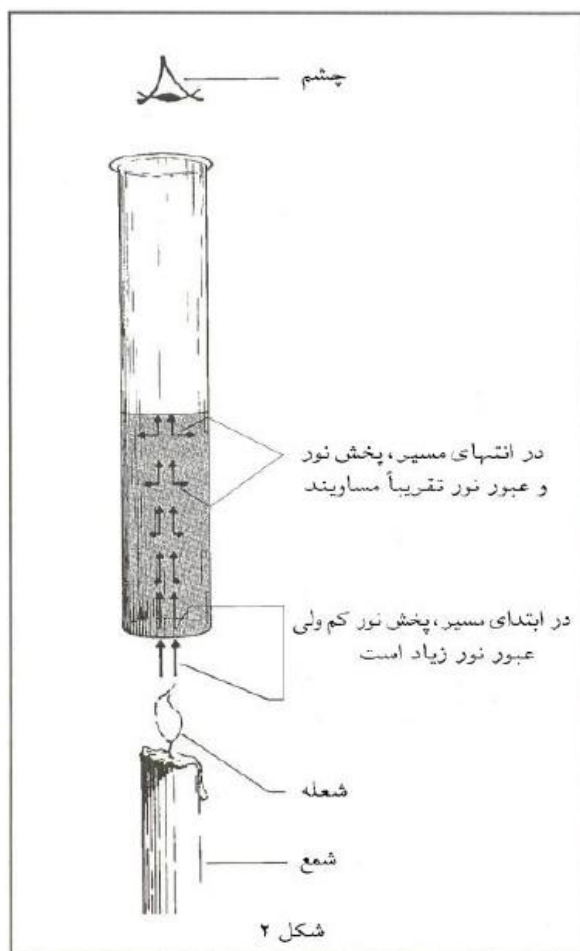


شکل ذره و ضریب انکسار نور نیز تأثیر بسزایی در شدت و هارمونی پخش نور دارند. بصورت کلی می توان عنوان نمود که ذرات کروی شکل تمایل به پخش نور به سمت جلو داشته و کمتر نور را به عقب پخش می نمایند در حالیکه ذرات میله ای شکل تمایل به پخش نور به سمت عقب دارند. همچنین اگر ضریب انکسار یا شکست نور ذرات نسبت به آب زیاد باشد شدت پخش و پلا شدن نور بیشتر خواهد شد.

رنگ ذرات که به عنوان رنگ زمینه آب تلقی می شود نیز تأثیر بسزایی در میزان پخش نور دارد. ذرات رنگی در طول موج های خاصی از نور مرئی آن را جذب نموده و سبب ایجاد تغییر در خصلت نور رسیده به دتکتورها می گردند. به هر حال همه این خواص

دست به دست هم می دهند تا در مواقعی که غلظت املاح یا رنگ آنها در آب بسیار زیاد است اندازه گیری کدورت به سادگی میسر نگردیده و این به عنوان حد بالای رنج اندازه گیری کدورت تلقی می گردد.

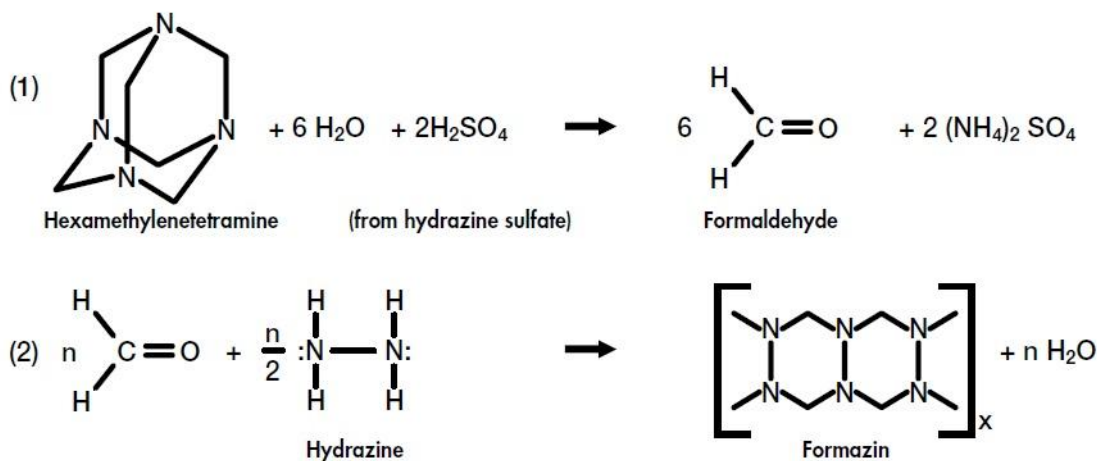
اولین کوشش ها برای کمی کردن کدورت سنجی در سال ۱۹۰۰ توسط آقای Jackson و Whipple به وقوع پیوست. این دو نفر، با تهیه محلول 1000ppm دیاتومه (Diatomaceous) و رقیق سازی آن با آب مقطر توانستند محلول های استاندارد بسازند که بتوان از آنها به عنوان رفرنس های کدورت سنجی استفاده نمود. این محلول ها اساساً بر اساس ppm سیلیکا ساخته می شدند. دستگاه کدورت سنج و واحد کدورت سنجی که این دو نفر ابداع نمودند بسیار ساده و ابتدایی بود که بعدها این واحد به نام Jackson Turbidity Unit JTU شهرت یافت. شماتیکی از کدورت سنج ابداعی Jackson در شکل زیر آمده است.



همانگونه که مشاهده می شود استوانه ای روی یک شمع ساده قرار گرفته است، درون استوانه محلول های استاندارد با غلظت های متفاوتی از سیلیکا ریخته شده و از بالا به شمع روشن نگاه می شد هر ارتفاعی از محلول که شکل شعله شمع، وضوح خود را از دست می داد به عنوان عدد محلول مربوطه علامت گذاری می شد. با این وسیله ساده می توانستند کدورت محلول های متفاوت را بر اساس استانداردهای ppm سیلیکا اندازه گیری و بر اساس واحد JTU گزارش نمایند. اگر چه این وسیله بسیار ساده کار میکرد اما به هر حال ساخت محلول های استاندارد با استفاده از کاتولین، گل سرشور و رسوب رودخانه تکرار پذیری خوبی نداشت و در خطای اندازه گیری تأثیر چشمگیری داشت.

محلول استاندارد فرمازین

امروزه متداولترین محلول استاندارد کدورت سنجی محلول استاندارد فرمازین است که با دقت و تکرارپذیری فوق العاده بالایی تهیه می گردد. در شرایط متعارفی می توان این محلول را با تکرارپذیری و دقت $\pm 1\%$ درصود تهیه نمود. به همین دلیل امروزه در صنعت آب، متداول ترین و دقیق ترین محلول های استاندارد با استفاده از محلول های فرمازین تهیه می گردند. اگر به ساختمان مولکولی فرمازین دقت گردد زنجیره های پلیمری با طول های متفاوتی دیده می شود که بصورت رندوم کنار هم قرار گرفته اند. این امر سبب می گردد که درون محلول فرمازین گستره اندازه ذرات از 0.1 تا 10 میکرون داشته باشیم، و این گستره اندازه و شکل، دقیقاً چیزی است که ما اغلب درون محلول های طبیعی نظیر آب می یابیم. به دلیل تکرارپذیری دقیق پخش نور Scattering درون این محلول، می توان کدورت سنج های نفلومتری با لامپ تنگستن را به طرز بسیار دقیقی با این محلول ها کالیبره نمود.



دقت فوق العاده بالای محلول فرمازین سبب گشت که ناشران کتاب Standard Methods در چاپ سیزدهم اقدام به جایگزینی واحد Formazin Turbidity Unit FTU با سیار واحدهای نوری یا وزنی مانند ppm Silica نمایند. محلول های استاندارد فرمازین توسط موسسه های معتبری چون انجمن بهداشت عمومی آمریکا (APHA)، انجمن آب آمریکا (AWWA) و سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده USEPA بعنوان استانداردهای اولیه کدورت سنجی پذیرفته شده اند که امروزه تقریباً تمام کدورت سنج های موجود بر اساس این محلولها کالیبره می گردند. نظر به آنکه برای نیل به دقت بالا، این محلول ها باید تحت

شرایط ویژه ای و با دقت بسیار بالایی در آزمایشگاه و توسط متخصصین زبده ای ساخته شوند، USEPA استفاده از محلول های ثانویه استاندارد را نیز توصیه می نماید. این استانداردها عمدتاً به شکل ژل درون ویالهای آکبند توسط کمپانی های سازنده کدورت سنج ها یا مراکز معتبر و آزمایشگاه های رفرنس ساخته می شوند. ترکیب این ژلها اغلب متشکل از محلول فرمازین 4000NTU. محلول های تجاری حاوی دی وینیل بنزن و برخی ذرات اکسید فلزی است که توسط کمپانی های سازنده به شکل بسیار دقیق و کنترل شده ای ساخته می شوند.

نفلومتری

نیاز به اندازه گیری های دقیق کدورت در محدوده های بسیار پائین، سبب شد که متخصصین این امر دست به تلاش های گسترده ای در ابداع تجهیزات مدرن تر نمایند. کدورت سنج های ابتدایی که بر اساس واحد جکسون کا ر می کردند قادر نبودند کدورت های کمتر از 25JTU را بسنجند همچنین این دستگاهها به طرز مشخصی به دقت چشم انسان وابسته بودند. همچنین به خاطر استفاده از شعله شمع در این کدورت سنج ها، مبنای کدورت سنجی بر اساس نور شعله (زرد متمایل به قرمز) بوده است. این رنگ تقریباً انتهای باند نور مرئی است یعنی جایی که ذرات ریز تمایل به پخش آن ندارند. این موضوع سبب می شد که کدورت سنج های جکسون از اندازه گیری کدورت محلول های حاوی ذرات بسیار ریز عاجز باشند.

به منظور حذف خطاهای چشم انسان در کدورت سنجی، سنسورهای فتوالکتریکی در ساختمان کدورت سنج ها بکار رفت که روز بروز مدرن تر گشته و بر دقت اندازه گیری افزودند. اما هنوز کدورت سنج های ابداعی دارای خطای قابل ملاحظه ای در کدورت های بسیار پائین یا بسیار بالا بودند. به دلیل آن که در اغلب کدورت سنج ها، دتکتور نور در زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به منبع تابش قرار داشت. برای محلول های بسیار زلال با کدورت بسیار کم، نور دریافتی توسط دتکتور نصب شده در زاویه ۱۸۰ درجه، تقریباً مساوی نور ارسالی توسط منبع نور می باشد. یعنی پخش نور توسط نمونه های بسیار زلال آنقدر کم است که دتکتورهای معمولی قادر به تشخیص تفاوت آن نیستند. این موضوع سبب گشت که متخصصین ساخت کدورت سنج ها دتکتور نور را در زاویه ۹۰ درجه نسبت به منبع تابش نصب نمایند. پخش نور در زاویه ۹۰ درجه بسیار واضح و چشمگیر است به طوریکه سنسورها به راحتی قادر به تشخیص آن حتی در کدورت های بسیار پایین هستند. کدورت سنج های مبتنی بر این روش به نام نفلومترها مشهور می باشند که در آنها مسیر باز پخش نور و موقعیت دتکتور دریافت آنها، نسبت به جهت اصلی نور تابیده شده، بر هم عمودند.

به دلیل حساسیت فوق العاده نفلومترها و دقت بسیار بالای آنها، سازمان محیط زیست آمریکا USEPA واحد نفلومتری Nephelometric Turbidity Units NTU را به عنوان واحد قابل قبول کدورت سنجی جهت گزارش، انتخاب و معرفی نمود.

هر واحد جکسون JTU معادل ۴ برابر NTU می باشد (JTU=4NTU1).

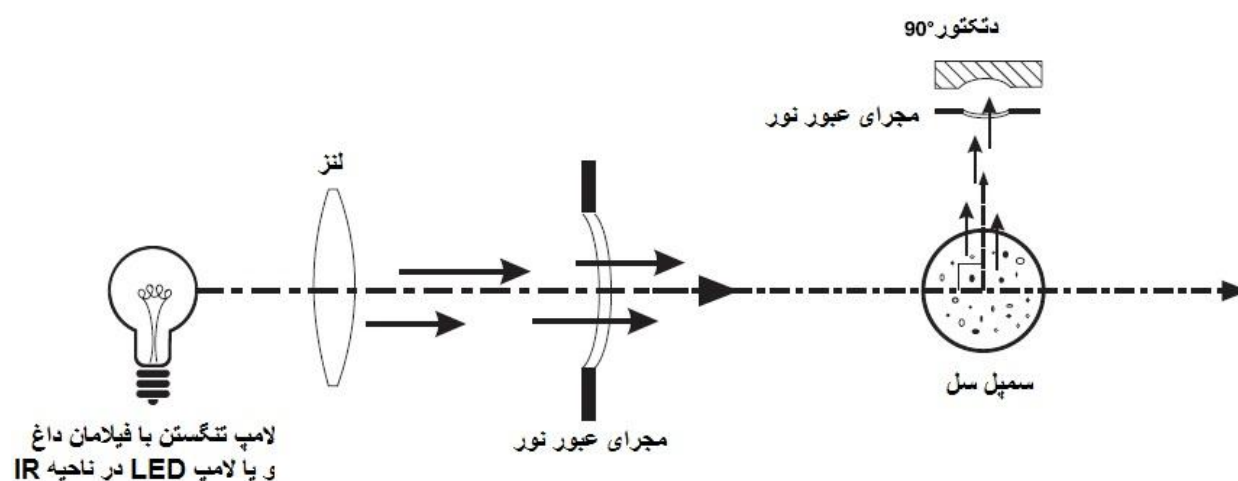
اجزای کدورت سنج ها

صرف نظر از کمپانی سازنده، نوع برد الکترونیک و نرم افزار موجود در میکروپروسسور کدورت سنج ها و دقت در ساخت و تهیه آنها، عمدتاً می توان چنین اذعان داشت که کدورت سنج ها از سه جزء اصلی تشکیل یافته اند که این اجزاء بر دقت کار آنها تأثیر فراوانی دارند:

۱- منبع نور Light Source

۲- دتکتور Detector

۳- ساختمان هندسی سیستم اپتیک کدورت سنج ها Optical Geometry



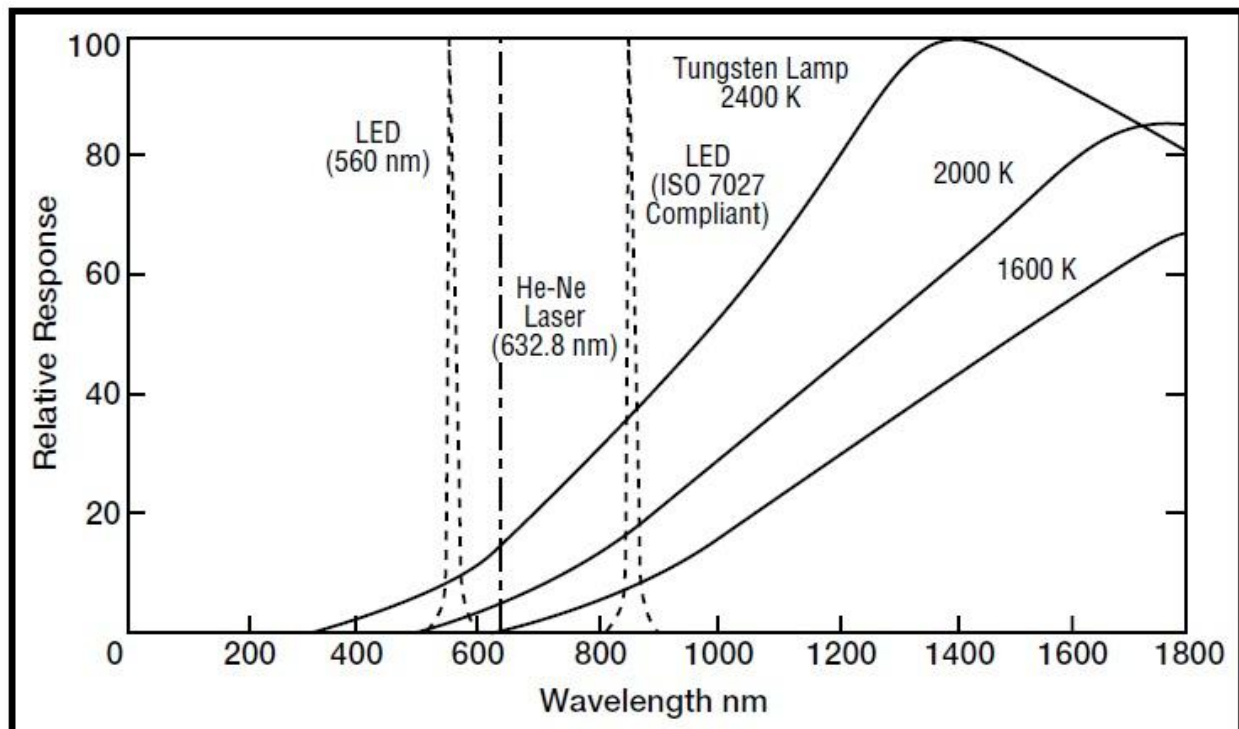
منبع نور

اگر چه گونه های متفاوتی از منابع نور با جنس های متفاوت در ساخت نفلومترها استفاده گردیده، اما عمومی ترین کاربرد، متعلق به منبع نور با فیلامان تنگستنی بوده است. طیف تابشی این منبع نور بسیار گسترده، غیر همگون و متغیر است. درجه حرارت فیلامان این منبع نور در نوع طیف تابشی آن بسیار موثر است و جهت تولید رنگ خاصی توسط فیلامان تنگستنی، نیاز است درجه حرارت آن به حد خاصی رسیده باشد.

بنابراین دستیابی به رنگ سفید فیلامان که تمام طیف تابشی را در بر داشته و مشتمل بر همه رنگ های مرئی باشد، کاملاً وابسته به ولتاژ عملیاتی لامپ است. بدین ترتیب دستیابی به رنگ سفید پایدار و ثابت، مستلزم استفاده از منبع تغذیه با ولتاژ بسیار منظم است. هرگاه نیاز به طیف تابشی خاصی داشته باشیم و همچنین اگر بخواهیم در نمونه مورد اندازه گیری، مطالعات خود را روی ذرات با ابعاد و تعداد خاصی متمرکز نماییم، می توانیم از منابع تابشی دقیق تری استفاده کنیم. مثلاً می توان از دیودهای ساطع کننده نور (LED) استفاده کنیم. LED پهنای بسیار باریک و خاصی از طیف موج الکترومغناطیسی را تابش می نماید. این

خصلت LED سبب گشته است که وقتی به عنوان منبع تابش در نفلومترها بکار رود منبع تغذیه بسیار ساده تری نسبت به لامپ های تنگستنی نیاز داشته باشد.

سایر لامپ ها مثلا لامپ های جیوه و سیستم های منوکروماتیک دیگر، کاربرد وافری در نفلومترها ندارند. شکل زیر طیف تابشی لامپ LED با طول موج 560nm، لامپ لیزری هلیوم- نئون با طول موج 632nm، و لامپ LED با طول موج 860nm را در مقایسه با طیف تابشی لامپ های تنگستنی در سه درجه حرارت مختلف 2200K، 1600K و 2400K را نشان می دهد.



همانگونه که ملاحظه می گردد لامپ های LED و لیزری در پهنای بسیار باریک و مشخصی طیف دارند در حالیکه طیف تابشی لامپ های تنگستنی بسیار گسترده و باز است.

دکتور

پس از آنکه نور ساطع شده از لامپ، از میان نمونه عبور نماید با ذرات داخل نمونه برخورد می نماید. می بایست اثر این برخورد توسط بخش دیگری از نفلومترها تشخیص و تجزیه و تحلیل شوند که این بخش، دکتور نامیده می شود. چهار دسته کلی برای دکتورهای که در نفلومترها کاربرد دارند وجود دارند:

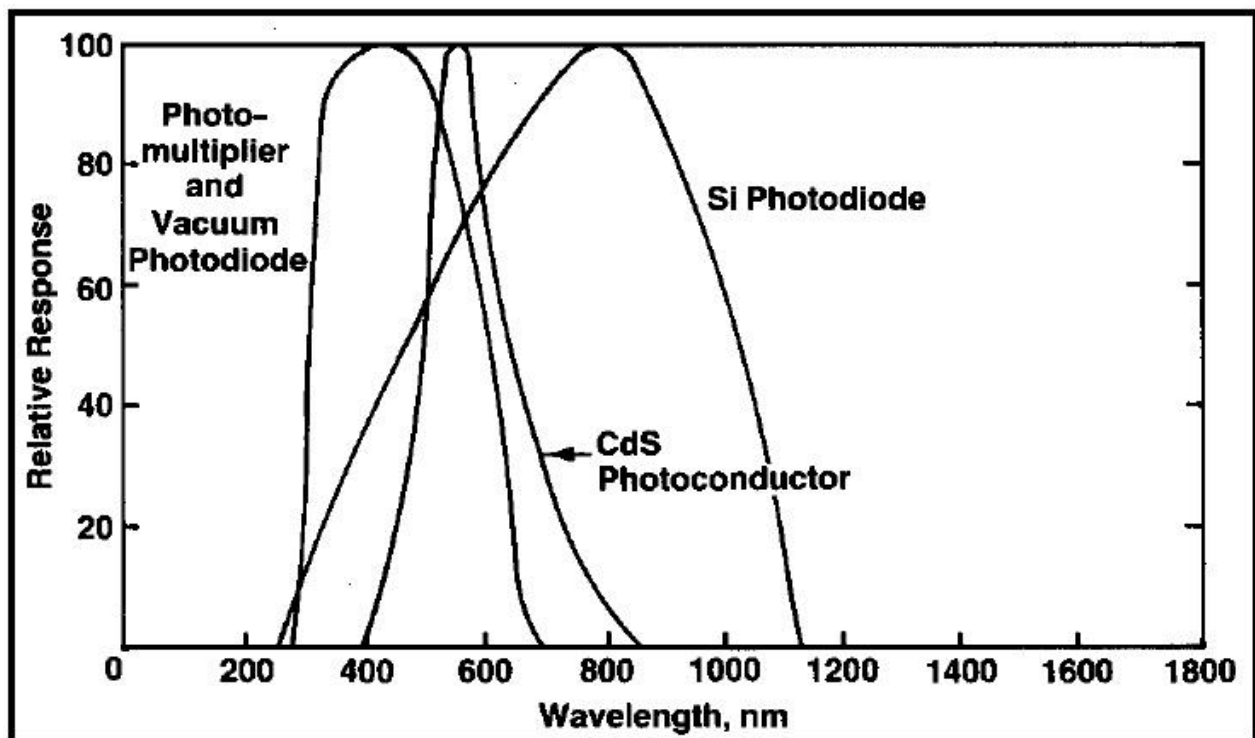
۱. Photomultiplier tube

۲. Vacuum Photodiode

۳. Silicon Photodiode

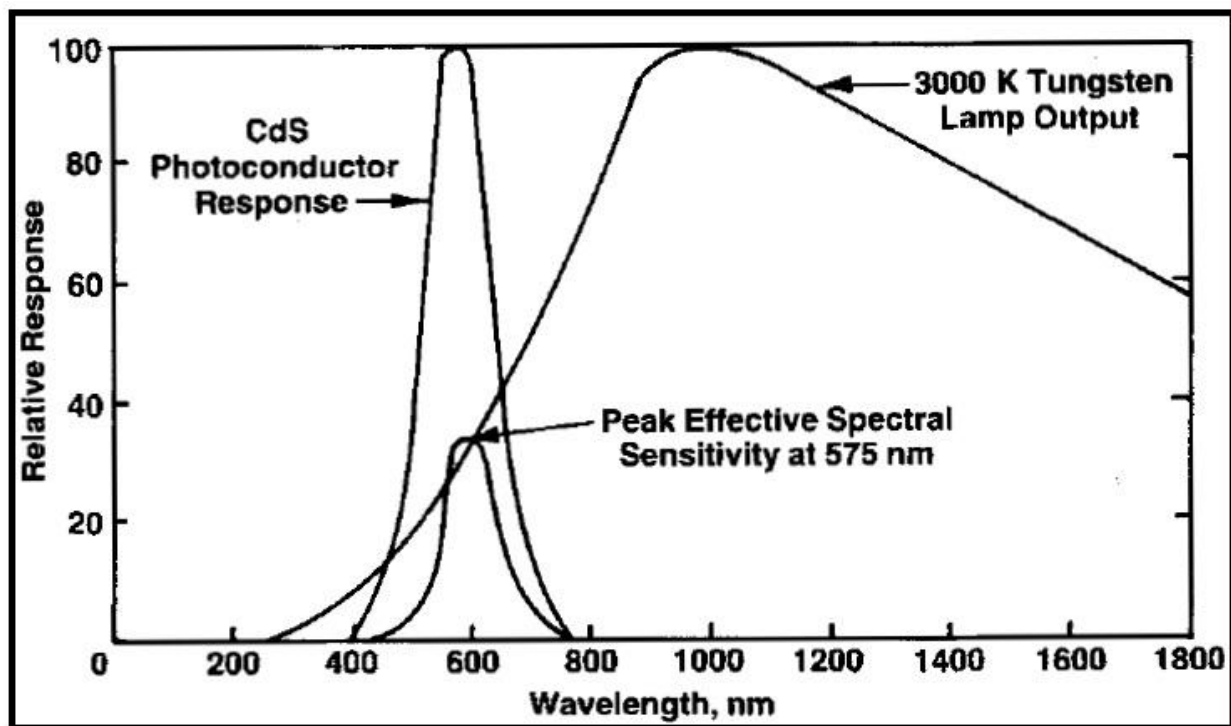
۴. Cadmium Sulfide Photoconductor

تفاوت عمده این دتکتورها در پاسخی است که آنها به پهنای خاصی از طیف تابشی منبع نور می دهند همانگونه که در شکل زیر مشاهده می شود حساسیت بالای پاسخ دتکتورهای فتو مالتی پلایر در طول موج های نزدیک UV و قسمت ابتدایی باند مرئی (رنگ آبی) است. به همین دلیل برای تثبیت و پایداری پاسخ این دتکتورها، به منبع تغذیه با ولتاژ بالا و بسیار دقیق نیاز داریم. این وضعیت برای فتو دیودهای تحت خلاء (Vacuum Photodiode) مشابه بوده اگر چه این فتودیودها پاسخ پایاتری نسبت به فتو مولتی پلایرها دارند. اما معضل عمده آنها آن است که رطوبت محیط تأثیر فراوانی در پایداری پاسخ آنها دارد. فتو دیودهای سیلیکونی حساسیت بالایی برای پاسخ در منطقه انتهائی مرئی (رنگ قرمز) و NIR دارند و منطقه پاسخ فتوکانداکتورهای کادمیم سولفید در منطقه مرئی و بین دتکتورهای دیگر می باشد.

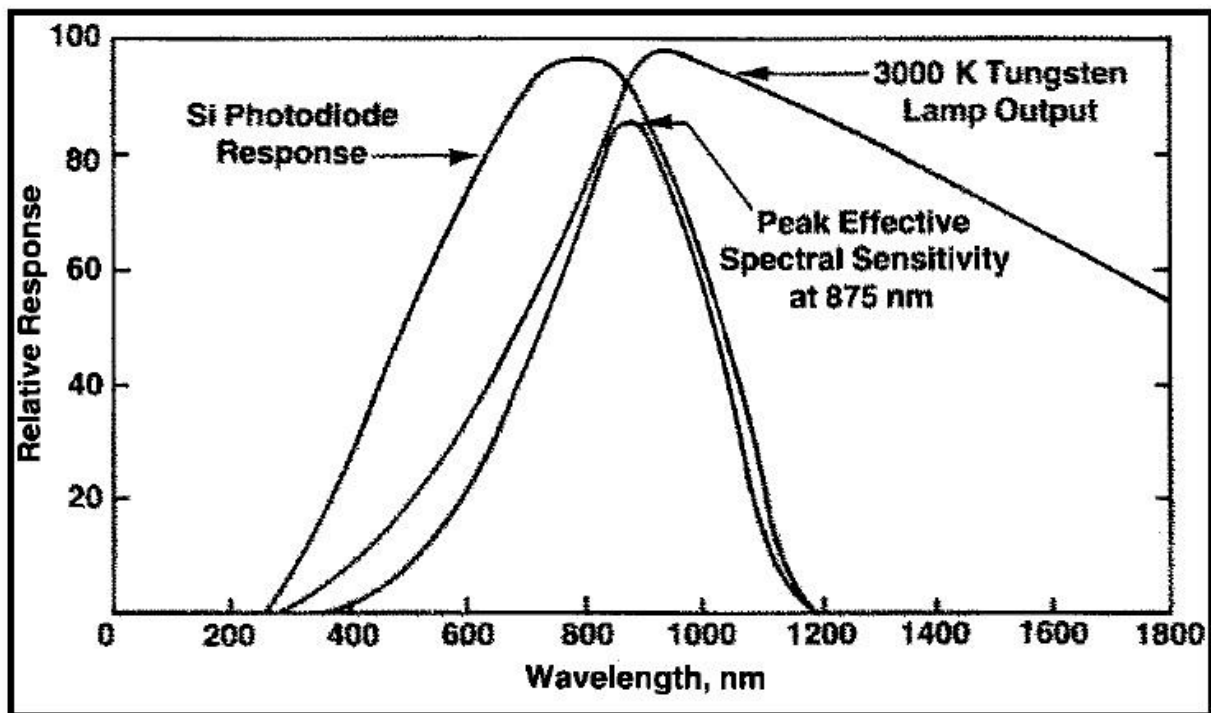


اما آنچه بر دقت عملکرد کدورت سنج ها تأثیر فوق العاده بالائی دارد، میزان همپوشانی و نزدیکی طیف تابشی منبع نور (لامپ کدورت سنج) با طیف پاسخ دتکتورهای کدورت سنج است. بطور کلی این قاعده در کدورت سنج ها وجود دارد که برای یک دتکتور معین، لامپ ها با طول موج های کوتاهتر (نزدیکتر به منطقه UV و یا ابتدای Visible) نسبت به ذرات کوچکتر حساسیت بالاتری داشته و نسبت به ذرات بزرگتر درون نمونه حساسیت کمتری دارند. بر عکس، لامپ های با طول موج بلندتر (مثلا LED های نزدیک به IR) به ذرات بزرگتر درون نمونه، حساسیت بیشتری دارند. پاسخ دتکتورها نیز اثر مشابهی نسبت به سایز ذرات دارد. چرا که کدورت سنج هایی که از دتکتورهائی با جنس Photomultiplier یا Vacuum Photodiode (با پاسخ نزدیک به منطقه UV) استفاده می نمایند به مراتب نسبت به ذرات کوچکتر حساسیت بیشتری نشان می دهند.

اما همانگونه که متذکر شدیم، برای درک بهتر واکنش هاو رفتارهای نفلومترها به سایز ذرات، می بایست همپوشانی پاسخ دتکتور و طیف تابشی منبع نور در کنار هم بررسی گردند. در شکل زیر منحنی طیف تابشی یک کدورت سنج با منع لامپ تنگستنی در کنار طیف پاسخ دتکتور کادمیم سولفید رسم گردیده است. همانگونه که در شکل مشاهده می گردد برآیند دو طیف تابش و پاسخ دارای یک قله (ماکزیمم پیک) در حوالی 575nm است.



اما شکل زیر این وضعیت را برای کدورت سنجی نشان می دهد که دارای لامپ تنگستنی ولی دتکتوری از جنس فتودیود سیلیکونی است. در این شکل ملاحظه می گردد که برآیند دو طیف تابش و پاسخ دارای قله ای در حوالی 875nm می باشد. بنابراین کدورت سنجی که بر اساس طول موج 575nm ساخته شود به مراتب به ذرات کوچکتر حساسیت بیشتری نسبت به کدورت سنجی دارد که بر اساس طول موج 875nm ساخته شود. همچنین از این دو شکل می توان استنباط نمود که کدورت سنجی که طیف های تابش و پاسخ آن همپوشانی بیشتری دارند راندمان و کارائی بیشتری دارد.



شکل هندسی سیستم اپتیکی

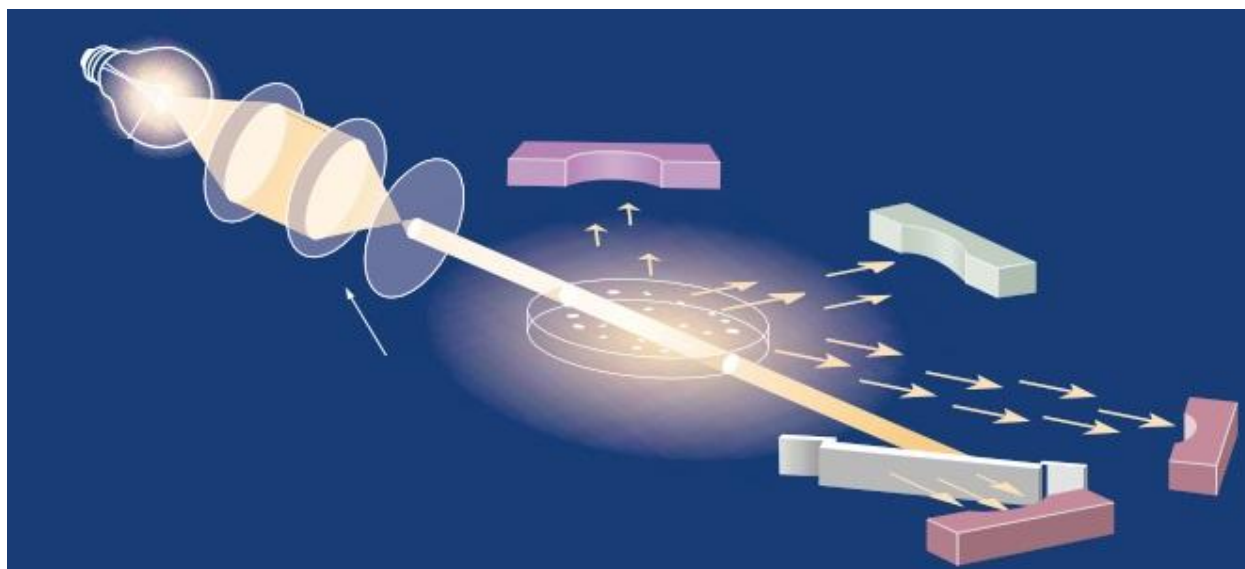
سومین عامل تأثیرگذار بر دقت و حساسیت کدورت سنج ها، شکل هندسی سیستم اپتیکی آنهاست. شکل هندسی در واقع مبین جهت نور پخش شده توسط ذرات، به جهت نور تابیده شده توسط منبع تابشی است. در اغلب کدورت سنج ها، دتکتور درمحل نصب میگردد که زاویه نور رسیده به آن (پخش شده توسط ذرات) در وضعیت ۹۰ درجه نسبت به جهت نور تابیده شده از طرف منبع تابشی باشد. این موضوع سبب کاهش چشمگیر نورهای سرگردان می شود. به این دسته از کدورت سنجها، نفلومتر نیز گفته می شود و به این تکنیک خاص کدورت سنجی، نفلومتری گفته می شود.

ثابت سل (طول مسیر پیمایش نور درون نمونه یا به واقع قطر سمپل سل کدورت سنج) نیز، علاوه بر خطی بودن جواب، بر حساسیت کدورت سنج ها نیز تأثیر فراوانی دارد. هر چه طول مسیر عبور نور افزایش یابد حساسیت کدورت سنج بالاتر می رود. اما به دلیل آنکه با افزایش طول مسیر، نور با ذرات متفاوت از نظر جنس و همچنین با ابعاد متفاوت برخورد می کند، میزان جذب و پخش نورمتغیر بوده بنابراین میزان خطی بودن سیستم کاهش می یابد. بنابراین همیشه سعی می گردد که حالت بهینه و بینابینی برای ثابت سل تعیین گردد. هر دو معیار **ISO7027** و **EPA180.1** مسیر پیمایش نور (از محل فیلامان منبع تابش تا دتکتور) را کمتر از 10cm پیشنهاد می نمایند. به منظور دستیابی به قوانین مدون، دو موسسه معتبر در جهان اقدام به وضع دستورالعمل هایی برای طراحی شکل هندسی و سیستم کدورت سنجها نموده اند. **USEPA** برای بازار ایالات متحده و سازمان **ISO** برای بازار اروپا قوانینی را وضع نموده اند که سازندگان مجبورند بر اساس آنها رفتار نمایند.

قوانین و دستورالعمل های USEPA180.1

این دستورالعمل، متداولترین دستورالعملی است که سازندگان کدورت سنجها از آن تبعیت می نمایند. دستورالعمل USEPA180.1 با دستورالعمل Standard Methods 2130B همخوانی کاملی دارد. مهمترین بندها و رؤوس این دستورالعمل بشرح ذیل می باشند:

۱. دتکتور نور می بایست در زاویه 90° (با $\pm 30^{\circ}$ امکان جابجائی) نسبت به جهت نور تابیده شده از لامپ نصب گردد.
۲. منبع تابش می بایست لامپ تنگستن باشد که قادر به رسیدن به درجه حرارت 2200°K تا 3000°K می باشد. بنابراین منبع تغذیه منظم و دقیقی باید برای آن طراحی گردد.
۳. پاسخ دتکتور به طیف تابشی باید دارای قله ای در محدوده 400 تا 600nm باشد. بنابراین باید یک فیلتر شیشه ای آبی رنگ در مسیر عبور نور قرار گیرد.
۴. دامنه اندازه گیری باید بین NTU40-0 باشد و نمونه های کدرتر باید رقیق گردند.



کدورت سنج های مبتنی بر استاندارد USEPA180.1 با لامپ تنگستنی

مزایای تبعیت از استاندارد USEPA 180.1 عبارتند از:

- کدورت سنج مبتنی بر این استاندارد، از لامپ مرئی بهره می برد و این بدان معنی است که اندازه گیری کدورت با استفاده از طول موج کوتاهتر صورت می پذیرد. بدین ترتیب این نوع کدورت سنج ها به ذرات ریز بسیار حساستر خواهند بود.
- لامپ های تنگستن در محدوده ای از طول موج، نور را می تابند که ذرات ریز، ۹ برابر بهتر از طول موج های بالاتر، این نور را پخش می کنند.

- این قاعده برای آبهای با کدورت کمتر از ۱ NTU بسیار دقیق است.
- لامپ های تنگستن به راحتی قابل دسترس بوده و ارزانند بنابراین هزینه های سرویس و نگهداری این گونه نفلومترها پایین است.
- درک قواعد و دستورالعمل های EPA180.1 ساده بوده و به راحتی قابل اجرا می باشند.

اما دو عیب کلی بر این روش متصور است:

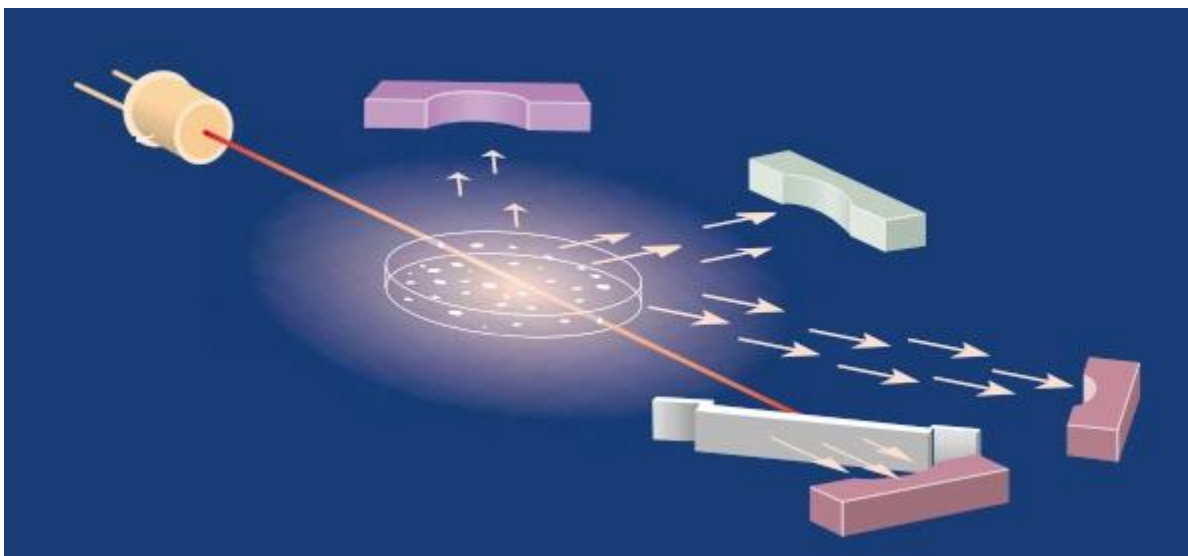
۱. در منطقه طول موج 400-600nm، رنگ زمینه آب نیز جذب دارد بنابراین کدورت سنجی نمونه های دارای پس زمینه رنگی نیاز به تمهیدات خاصی دارد.
 ۲. لامپ های تنگستنی نیاز به زمان خاصی برای گرم شدن دارند تا فیلامان آنها به حد سفید شدگی برسد. همچنین این نفلومترها نیاز به کالیبراسیون ادواری زیادی دارند و مرتباً باید کالیبره گردند.
- به هر حال نظر به آنکه در آب شرب می بایست کدورت آب بسیار پایین باشد استفاده از این دستورالعمل، اطمینان خاصی نسبت به دقت اندازه گیری می بخشد. امروزه حد بالای کدورت آب شرب 2NTU بوده و می بایست با دقت 0.3NTU اندازه گیری گردند. تلاش برای رساندن این معیارها به حداکثر 1NTU با دقت 0.2NTU نیز در حال انجام است بنابراین واضح است که کدورت سنج های با دقت فوق العاده بالا در کدورت های پائین، کارائی فراوانی دارند.

قوانین و دستورالعمل های ISO7027

همانگونه که ذکر شد این معیار، یک معیار اروپایی است. بنابراین اغلب سازندگان اروپایی کدورت سنج ها، یا سازندگانی که قصد فروش تجهیزات خود در بازار اتحادیه اروپا را دارند می بایست از این معیار تبعیت نمایند:

مهمترین رؤس این دستورالعمل به شرح ذیل می باشند:

- ۱- دتکتور نور باید در زاویه 90° (با حداکثر جابجائی $\pm 1,5^\circ$) نسبت به جهت تابش نور از منبع تابش نصب گردد.
- ۲- منبع تابش می بایست نوری با طول موج 860nm ساطع نماید. بنابراین منبع تابش LED باید در آن بکار رود. همچنین می توان از لامپ تنگستنی در کنار مونوکروماتور دقیق برای نیل به طول موج محدوده 860nm بهره برد. باند طیف تابش می توان ۸۶۰ با حداکثر $\pm 30nm$ پهنا باشد.
- ۳- محدوده اندازه گیری 0-40 NTU بوده و نمونه های کدرتر باید رقیق شوند.



كدورت سنج های مبتنی بر استاندارد ISO 7027 با لامپ LED

مهمترین مزایای تبعیت از معیار ISO7027 عبارتند از :

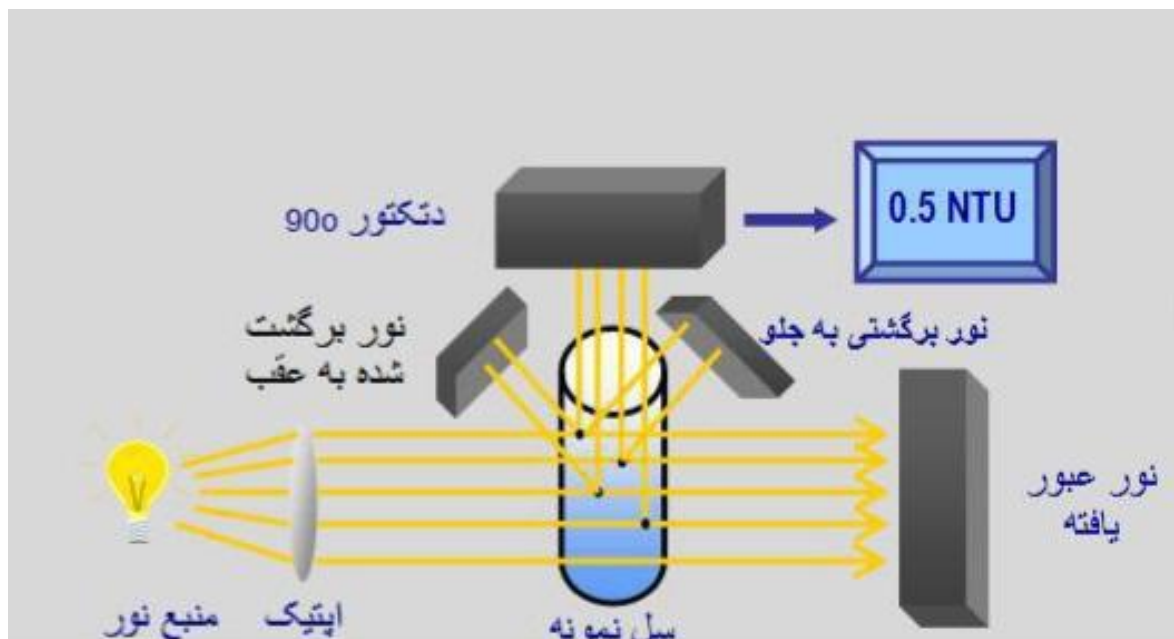
- با بهره گیری از سیستم اپتیکی دقیق در حد منوکروماتور، طیف تابش بسیار پایا می باشد.
- در این منطقه از طیف تابش، جذب نور توسط نمونه بسیار کم است.
- نورهای سرگردان به حداقل خود می رسند.
- اما مهمترین ضعف این استاندارد آن است که نفلومترهای مبتنی بر آن به ذرات کوچکتر حساسیت کمتری دارند. اگر چه می توان از نظر الکترونیکی، با نصب آمپلی فایرها حساسیت این گونه نفلومترها را نسبت به ذرات کوچک، بالا برد اما به هر حال نصب چنین آمپلی فایر خود به خود باعث ایجاد noise خصوصاً برای کدورت های فوق العاده پایین می گردد.

به صورت کلی می توان چنین اذعان داشت که در کدورت های فوق العاده پایین نفلومترهای مبتنی بر سیستم ISO7027 اعداد کدورت را کمی کمتر از نفلومترهای مبتنی بر EPA180.1 قرائت می کنند..

تکنیک های پیشرفته

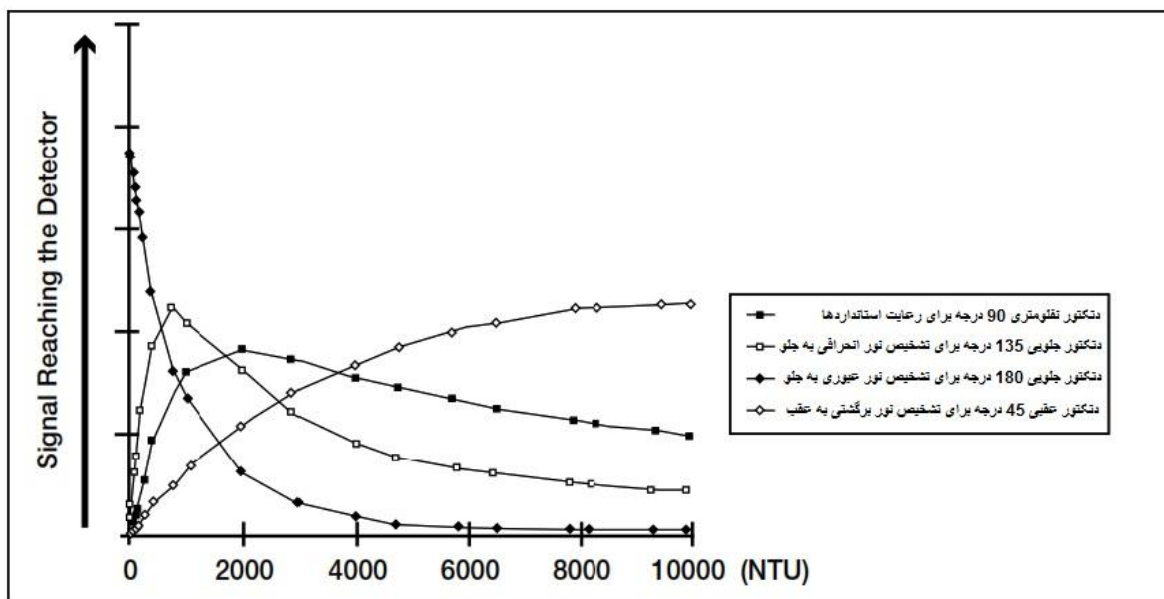
صنایع متفاوتی وجود دارند که بواسطه ماهیت نمونه مورد بحث آنها، اندازه گیری دقیق کدورت نمونه به سادگی امکان پذیر نیست. صنایع تولید نوشیدنی ها، صنایع غذایی، آبهای آلوده به مواد نفتی و هر نمونه آب دیگری که دارای زمینه رنگی باشد همگی مواردی هستند که کدورت سنج های معمولی دارای خطای اندازه گیری کدورت هستند چرا که این کدورت سنجها نمی توانند تفاوتی میان رنگ زمینه و کدورت نمونه قائل گردند.

برای رفع چنین مشکلی سیستم اپتیکی کدورت سنجها دستخوش تغییراتی گشت که بر اساس آن بتوان علاوه بر زاویه 90° نسبت به جهت تابش نور، در جهت های اصلی دیگر نیز میزان پخش نور را بررسی نمود. شکل زیر سیستم اپتیکی نسل جدید کدورت سنج ها را نشان می دهد که به نفلومترهای Ratio معروفند.



همانگونه که مشاهده می گردد به جای یک دکتور، به طور همزمان از چهار دکتور در زوایای 180° (هم جهت با تابش نور)، 150° ، 90° و 42° نسبت به جهت اصلی تابش نور استفاده گردیده است. سیگنال های رسیده به هر کدام از این دکتورها با محاسبات ریاضی دقیقی به هم مربوط گشته تا از برآیند آنها، کدورت نمونه محاسبه شود. اگر فقط دکتور نصب شده در زاویه 90° وارد مدار گردد سیستم مزبور یک نفلومتر ساده تلقی می شود. اما برای محلول های بسیار کدر یعنی جایی که سایر دکتورها رفتار خطی نسبت به تغییرات کدورت ندارند، دکتور عقبی (Back Scatter) نقش خویش را به خوبی در اصلاح و افزایش دقت کدورت سنجی بازی می نماید. وجود همین دکتور سبب می گردد که کدورت سنج مزبور بتواند به خوبی کدورت نمونه های بسیار کدر (تا حد 100000NTU) را بسنجد.

مطالعه رفتار هر دکتور در قبال افزایش یا کاهش کدورت نمونه، ما را با نقش کاربردی هر دکتور بیشتر آشنا می سازد در شکل زیر منحنی رفتاری هر چهار دکتور به صورت جداگانه در قبال افزایش کدورت رسم شده است.



منحنی با علامت $\blacklozenge$ مربوط به پاسخ دتکتور نصب شده در زاویه 180° است. همانگونه که ملاحظه می شود در کدورت های بسیار پائین، بخش اعظم نور تابشی توسط منبع تابش، به این دتکتور می رسد و شاید بتوان گفت دتکتورهای دیگر نقش زیادی ندارند اما با افزایش کدورت، شدت نور دریافتی توسط این دتکتور به شدت کاهش می یابد بطوری که در کدورت های بالای 5000NTU، سیگنال حاصل از این دتکتور تقریباً قابل صرفنظر کردن است. این موضوع به صورت کاملاً عکس برای دتکتور عقبی Detector Back Scatter که در زاویه 45° نصب شده است، رخ می دهد. یعنی در کدورت های بسیار بالا سیگنال حاصل از این دتکتور سهم بیشتری در سیگنال متوسط دتکتورها دارد. بنابراین به منظور داشتن نفلومتري که بتواند گستره بسیار وسیعی از کدورت نمونه را با دقت بالا اندازه گیری نماید، وجود سیستم Ratio حیاتی است.

آنچه مهم است محاسبات ریاضی است که در طراحی الکترونیک این تجهیزات مدرن پیاده گشته است. محاسباتی که کدورت سنج های مدرن قادرند بر اساس آن سیگنالهای مربوط به دتکتورهای متفاوت را در کنار یکدیگر قرار داده، و کدورت نمونه را بر اساس این محاسبات بسنجند. فرمول ذیل نحوه محاسبه سیگنال متوسط را با استفاده از تمام سیگنالها نشان می دهد.

$$T = I_{90} / (d_0 \cdot I_t + d_1 \cdot I_{fs} + d_2 \cdot I_{b.s} + d_3 \cdot I_{90})$$

که در آن:

T: کدورت نمونه بر حسب NTU

I_{90} : شدت جریان حاصله توسط دتکتور 90°

I_t : شدت جریان حاصله توسط دتکتور 180°

I_{fs} : شدت جریان حاصله توسط دتکتور 150° یا Forward Scatter

lb.s: شدت جریان حاصله توسط دتکتور 45° عقبی (Back Scatter)

d0, d1, d2 و d3: ضرائب کالیبراسیون

مزیت عمده این کدورت سنج ها آن است که می توان سیستم Ratio را در آنها غیرفعال نمود و محاسبات به سادگی زیر خواهند بود:

$$T=a_0.I_{90}$$

که در آن a_0 ضریب یا ثابت کالیبراسیون است.

استفاده از چنین کدورت سنج ها مزایای فراوانی دارد که برخی از آنها بشرح ذیل می باشند:

۱. در کدورت سنج های معمولی همانند هر سیستم دیگر اپتیکی - الکترونیکی، لامپ ها و دتکتورها منشاء خطاهای زیادی از جمله noise و Drift می باشند. بکارگیری دتکتورهای پیشرفته از جنس فتودتکتورهای سیلیکونی، سبب حذف چشمگیر خطای دتکتورها گشته است. همچنین استفاده از سیستم Ratio (بهره گیری همزمان از چهار دتکتور) سبب می شود دستگاه در بلند مدت دچار افت و خطا (به اصطلاح پیری) دستگاه نگردد.
۲. استفاده از سیستم Ratio سبب حذف قابل ملاحظه نورهای سرگردان می گردد. این موضوع در کدورت های فوق العاده پایین اهمیت مضاعفی دارد.
۳. وجود دتکتور در زاویه 135° یعنی Forward Scatter سبب گسترش ناحیه خطی بودن تابع رفتاری و کالیبراسیون کدورت سنج گشته بدون آنکه شاهد کاهش دقت در کدورت های بسیار پائین باشیم. این موضوع سبب می گردد تا اپراتور دستگاه به سادگی بتواند با یک منحنی کالیبراسیون گسترده، رنج وسیعی از کدورت (0-10000 NTU) را به سادگی بسنجد.
۴. از آنجائی که مسیر پیمایش نور از منبع تابش تا دتکتور 90° تقریباً مساوی مسیر پیمایش نور تا 180° است، اثر رنگ زمینه نمونه در کدورت کاملاً حذف می گردد. این بهبود دقت همچنین در خصوص کاهش مزاحمت ناشی از وجود ذرات محلول در آب نیز صدق می کند.
۵. وجود دتکتور عقبی Back Scatter، سبب بروز رفتار خطی نفلومتر در ناحیه بالای کدورت (4000-10000 NTU) می گردد.

مزاحمت نورهای سرگردان

نورهای سرگردان Stray Light خطای قابل ملاحظه ای بر دقت کدورت سنجی دارند. نور سرگردان به بخشی از نور رسیده به دتکتور اطلاق می شود که این بخش از نور از درون نمونه به دتکتور نمی رسد بلکه از سایر نقاط کدورت سنج به دتکتور ارسال می گردد. بدیهی است دتکتور به کل نور رسیده به خود پاسخ می دهد در حالیکه تنها آن بخش از نور دریافتی را می توان به

كدورت اختصاص داد كه از درون نمونه گذشته باشد. به همين دليل مي بايست تا حد امكان، نورهاي سرگردان را حذف نمود. منابع تابش نورهاي سرگردان متفاوتند. از جمله اين منابع مي توان به موارد ذيل اشاره نمود:

- ۱- استفاده از سل هاي كهنه با خط و خش زياد روي بدنه سل.
- ۲- نور تابيده توسط درپوش سل خصوصاً وقتي روي آن گرد و غبار نشسته باشد.
- ۳- خطاهای منبع تابش، چنانچه در ساختمان اپتيكي كدورت سنج ها از عدسي ها و آينه هاي خاصي جهت متمرکز کردن نور استفاده نشده باشد، نور تابشي واگرا بوده و به جای عبور از نمونه از جهات گوناگون تابيده ميشود.
- ۴- و در حد كمتري، خطاهای حاصل از الكترونيك دستگاه.

به منظور کاهش بهيه اين خطاها راه حل هائي نيز هميشه توصيه گرديده اند از جمله مي توان به موارد ذيل اشاره نمود:

- ۱- استفاده از سل هاي نو بدون خط و خش يا لكه هاي چربي موضعي و يا اثر انگشت.
- ۲- همچنين بسياري از سازندگان معتبر، استفاده از روغن سيليكون روي جداره خارجي سل را توصيه مي نمايند كه باعث مي شود روغن سيليكون مزبور، شيارهاي موجود در خط و خش سل ها را پر نموده و اين خطا را از بين ببرد.
- ۳- استفاده از آينه مشكي و لنز در ساختمان هندسي نفلومترها كه اين بند مي بايست توسط سازندگان كدورت سنج ها رعايت گردد.

اثر حباب درون نمونه

اپراتورهاي آزمایشگاه و متصديان كدورت سنجي همواره با معضلي به نام وجود حباب درون نمونه روبرو هستند. وجود حباب در نمونه باعث ايجاد خطاي مثبت در كدورت سنجي مي گردد. چنانچه نمونه داراي رسوبات زياد و ته نشين شونده نيست بهتر است قبل از اندازه گيري، سل حاوي نمونه را براي چند دقيقه به صورت ساكن روي ميز آزمایشگاه قرار داد تا حباب هاي احتمالي درون نمونه تخليه گردند. اما بسياري مواقع با نمونه هائي سر و كار داريم كه داراي املاح بالا بوده و چنانچه سل نمونه را به حال خود واگذاريم، املاح نمونه رسوب مي نمايند. در چنين مواقعي بهتر است نمونه به شدت تكان داده شده تا رسوبات آن كاملاً حل يا پخش گردند. سپس براي چند دقيقه، سل نمونه به صورت كاملاً آرام سر و ته گردد. اين عمل بايد آنقدر آرام باشد كه از يك طرف مانع رسوب مجدد گرديده و از سوي ديگر از ايجاد حباب درون نمونه ممانعت به عمل آيد. شايد مجبور باشيم اين عمل را چندين بار و به تناوب تكرار نماييم. برخي سازندگان كدورت سنجي اقدام به تعبيه سيستم تخليه حباب در ساختمان كدورت سنج ها مي نمايند. اين سيستم ها طوري عمل مي نمايند كه با دميدن هوا از پائين به درون سل، سبب مي شوند كه حباب هاي ريز به همدگر چسبيده و راحت تر تخليه شوند. در مواقعي كه ويسكوزيته نمونه بسيار بالا است (مانند كدورت سنجي در كنسانتره هاي ميوه) اين سيستم ها كمك شاين توجهي در کاهش خطاي حاصل از وجود حباب ها مي نمايند. البته ناگفته نماند كه طبيعي است كه وجود چنين سيستم هايي درون كدورت سنج ها، ساختمان آن ها را پيچيده تر نموده و به وسایل جانبي نظير پمپ يا دمنده هوا نياز خواهيم داشت.