مجموعه مقالات
چهارمین همایش ملی کاربرد فناوری هسته‌ای در علوم کشاورزی و منابع طبیعی
(۲۹-۳۰ اردیبهشت، ۱۳۹٤، پژوهشکده کشاورزی هسته ای)
The 4th National Congress on Nuclear Technology Application in Agricultural & Natural Resource Sciences (19-20 May, 2015, Nuclear Agriculture Research School)

اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی $^{13}C/^{12}C$ توسط لیزر

علی خراسانی[۱*]، ابراهیم مقیسه[۲]، میراحمد موسوی شلمانی[۳]، سارا سلطانی[۱]
۱- کارشناس پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای
۲- محقق پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای (دانشجوی دکتری) دانشگاه فردوسی مشهد،
۳- عضو هیئت علمی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای
نویسنده مسئول:akhorasani@nrcam.org

چکیده: یک تکنیک جدید برای نسبت‌های ایزوتوپی کربن بر پایه لیزر که بصورت مخفف با LARA نمایش داده می‌شود، بر اساس تغییرات زیاد ایزوتوپ‌ها در طیف‌های مولکولی با استفاده از لیزرهای ایزوتوپی با فرکانس ثابت و آشکارسازی حساس از طریق اثر "پیل نوری لیزری" بررسی شده است و با روش GC/IRMS برای دی‌اکسید کربن در کاربردهای خاص مقایسه شده است. امکان توسعه این روش برای سیستم‌های اندازه گیری نسبی ایزوتوپی با روش LARA رشد و توسعه داده شده است.

واژگان کلیدی: لیزر، ایزوتوپ پایدار،^{13}C

Measure the isotopic ratio ^{13}C / ^{12}C by Laser

Ali Khorasani[1]*, Ebrahim Moghise[2], Mir Ahmad Mousavi Shalmani[3], Sara Soultani[1]
1- Researcher at Nuclear Agriculture Research School,
2- Scientific committee of Nuclear Agriculture Research School
3-Resercher at Nuclear Science and Technology Research Institute, PhD University student of Ferdowsi Mashhad
akhorasani@nrcam.org

Abstract: A new technique for laser based analysis of carbon isotope ratios, with the acronym LARA, based on large isotope shifts in molecular spectra, the use of fixed frequency isotopic lasers, and sensitive detection via the laser optogalvanic effect is reviewed and compared with GC/IRMS for carbon dioxide in specific applications. The possibility for development of isotope ratio measurement systems with LARA is explored.

Keywords: Laser, Stable isotope, ^{13}C

مقدمه :

در سال ۱۹۹۴ برای اولین بار تکنیک جدید انالیز نسبت‌های ایزوتوپی کربن بر پایه لیزر گزارش شد. این روش بر اساس تغییرات زیاد ایزوتوپ در طیف مولکولی می‌باشد که از لیزرهای ایزوتوپی با فرکانس ثابت و آشکارسازهای حساس از طریق اثر "پیل نوری لیزری" قابل استفاده است. فعالیت‌های بعد از آن مشخص می‌کند که آنالیز نسبت‌های ایزوتوپی با استفاده از

لیزر که نام LARA به آن داده شده است یک روش جایگزین برای روش متدوال IRMS برای دی اکسید کربن در کاربردهای مشخص است و امکان طبقه بندی جدیدی از سیستم‌های اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی را فراهم می‌کند.

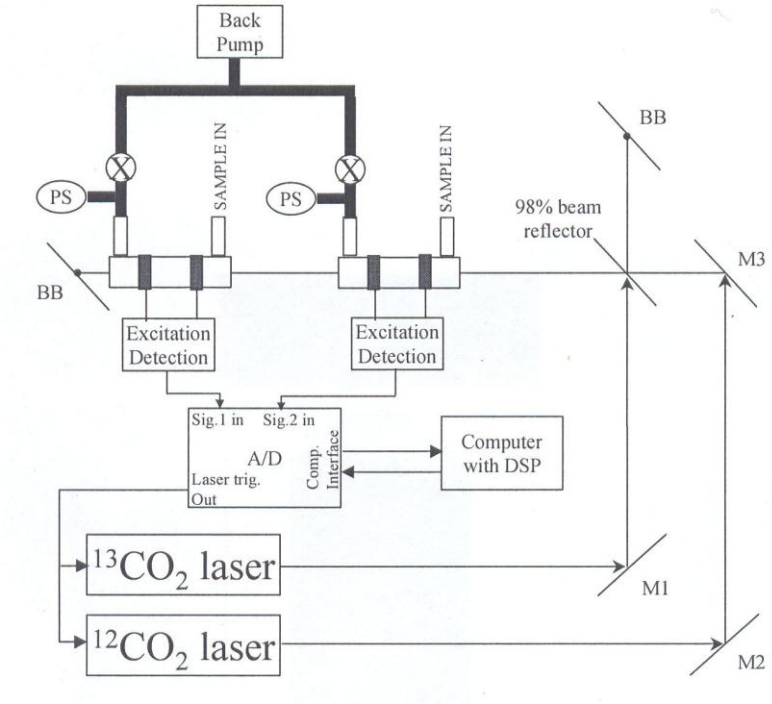
برای مدتها از اثر "پیل نوری لیزری" در طیف سنجی اتمی و مولکولی استفاده شده است. این موضوع بر اساس پاسخ الکتریکی یک گاز بدون بار الکتریکی به اختلالات نوری است. اگر شدت لیزر I و فرکانس V روی یک بدون بار الکتریکی ضعیف بتابد، پاسخ S با تخمین بسیار خوبی می‌تواند بصورت زیر محاسبه شود:

$$S=nLI(v)A\sigma(V)C$$

که در آن n یک دانسیته واقعی(مولکول بر سانتیمتر مربع) از گروه مشخصی از نمونه‌ها واکنشی است،L طول منطقه واکنش و A سطح اشعه لیزر است، σ سطح مقطع واکنش و C ثابت تناسبی " پیل نوری " می باشد.

شکل۱ یک نمایش شماتیکی از سیستم اندازه گیری پایه را برای $^{13}C/^{12}C$ در CO_2 نشان می‌دهد. دو نمونه و یا بیشتر، یک نمونه استاندارد و بقیه بصورت ناشناخته، در گاز بدون بار با قدرت پایین امواج رادیویی و تحت تابش لیزر ایزوتوپی دی اکسید کربن نگهداری شدند. آئینه‌های M1-M3، ترکیب اشعه‌های لیزری و نور به طرف سلولها تا در BB متوقف جهت داده می‌شود. سنسورهای فشار PS برای اندازه‌گیری فشار بکار می‌رود. جریان‌های الکتریکی بدون بار بوسیله مدارهای تهیج شده همچنین بازخورد سیگنالهای کامپیوتر S.A با DSP که ظرفیت سیگنال دیجیتال را دارند، سیستم را از طریق مبدل A/D از آنالوگ به دیجیتال و از طریق دیجیتال به آنالوگ کنترل می‌کند. نمونه‌ها در فشار پایین بوسیله پمپ‌های خلا و شیرهای قابل تنظیم کنترل شدند.

روشهای متعدد انتقالی بصورت ارتعاشی- دورانی میتواند برای تابش co_2 بکار گرفته شود. انتخاب روش انتقال برای $^{12}co_2$ و $^{13}co_2$ باید بقدری مناسب باشد تا بخوبی در طول موج قابل جداسازی باشد و بصورت اتوماتیکی در رزونانس با همان انتقال مولکولی در نمونه‌ها شرایطی را برای آنالیز نسبت‌های ایزوتوپی با ویژگیهای لازم فراهم کند. خالص سازی و یا غلظت سازی برای نمونه ها معمولا مورد نیاز نیست. شدت لیزر I، یک فاکتور بهره برداری (GAIN FACTOR) ایجاد می‌کند بطوریکه سیگنال‌ها برای ایزوتوپ‌های رقیق شده می تواند نسبت به هم دسته‌های اصلی تقویت شود. شدت موثر می‌تواند با استفاده از انعکاس دهنده‌های چند برابر کننده، با افزایش طول تخلیه الکتریکی (بدون بار) L تا چندین برابر افزایش می‌یابد. راه دیگر افزایش حساسیت با دو برابر کردن پارامتر C، با انتخاب وضعیت بهینه تخلیه الکتریکی (بدون بار) بدست می‌آید. یک تخلیه بهینه شامل حداقل ۵٪ CO_2 در نیتروژن است. مخلوط CO2 در نیتروژن بطور قابل توجهی اثر "پیل نوری" را افزایش می‌دهد که این بخاطر رزونانس تقریبی تغییر بین الکترون برانگیخته شده N_2 و حد بالایی لیزر CO_2 است. این همان دلیل اصلی است که لیزر CO_2 با قسمت اعظم گاز N_2 پر می‌شود.



شکل ۱ : نمایش شماتیکی سیستم LARA برای محاسبه نسبت ایزوتوپی $^{13}C/^{12}C$ در نمونه های گازی حاوی CO_2

بخش ناچیزی از قدرت لیزر در تخلیه الکتریکی جذب می‌شود. در واقع، در وضعیت آماده‌سازی یک فاصله کوچک در شدت لیزر I وجود دارد بطوریکه تعداد زیادی از نمونه‌ها و نمونه استاندارد بطور همزمان در ردیف‌هایی می تواند اندازه‌گیری شود. سیگنال اندازه‌گیری شده بصورت الکتریکی می‌باشد. هیچگونه اندازه‌گیری نوری برای حذف همه مجموعه‌ها تجزیه نوری یا مبدل نوری مورد نیاز نمی‌باشد. نورهای پراکنده اطراف که ممکن است سیگنال مورد بررسی را نامفهوم سازد، وجود ندارد. با بکارگیری اشعه‌های لیزر تعدیل شده و قفل شده در تکنیک آشکارسازی، به شدت نسبت سیگنال بالا به پارازیت قابل دستیابی است. با بکارگیری نرخ‌های تعدیلی نا مناسب، بطور همزمان سیگنال‌های زیادی میتواند اندازه‌گیری شود.

یک نسبت دوبل:

$$\left(\frac{\frac{^{13}S_x}{^{12}S_x}}{\frac{^{13}S_{std}}{^{12}S_{std}}} - 1 \right) \times 1000 \qquad (۲)$$

$$\frac{\frac{^{13}n_x}{^{12}n_x}}{\frac{^{13}n_{std}}{^{12}n_{std}}}.$$

بازده مستقیم نسبت نسبی ایزوتوپ δ همه پارآمترهای معادله ۱ مورد استفاده

نیست بجز برای :

(۳)

تکنولوژی LARA برای اندازه گیری نسبت ایزوتوپی هم با روش GC فرق دارد و هم با دیگر تکنیک‌های نوری گزارش شده. جدول ۱ مقایسه بین سیستم‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. به جز روش IRMS همه تکنیک های نوری بر اساس روش انتخاب جرمی می‌باشند. بنابراین جدایش شیمیایی و – یا غنی‌سازی CO_2 معمولا مورد نیاز نیست. تکنیک‌های نوری با تکیه روی عدم پیچیدگی خطوط طیف در معرض رزونانس نوری هستند که ممکن است یک محدودیت در حساسیت بوجود آورد که بدلیل محو شدن یا همپوشانی رزونانس‌های ایزوتوپی مشخص می‌باشد. هرچند LARA فقط بوسیله اثرات جزیی اختلاف‌های ممکنه با گازهای دیگر در نمونه و – یا نمونه استاندارد محدود شده است.

آنالیزهای IRMS با یک منبع یونی شروع می‌شود که اشعه‌های یونی از آن استخراج می‌شود. نمونه از طریق مجموعه جریان یونی در طی آنالیز تخریب می‌شود. تخلیه LARA به همان روش شبیه به تخلیه منبع یونی است، گرچه دانسیته یون پائین است و اندازه‌گیری‌ها در منطقه تخلیه الکتریکی به صورت غیرمخرب انجام می شود. نمونه‌های گازی می‌تواند برای آزمایشات مجدد بعدی در صورت تمایل ذخیره و نگهداری شود. دقت بدست آمده و البته زمان اندازه‌گیری نسبت به همه روش‌ها دو برابر است. به هر حال نمونه کمتری برای اندازه‌گیری در طیف سنجی مورد نیاز است که آنهم به دلیل معدل‌گیری مداوم از یک نمونه تغییر نیافته است.

جدول ۱ : آنالیز نسبت ایزوتوپی CO_2

پارامتر	IRMS	IR OPTICAL	LARA
پراکندگی	اشعه یون جرمی	لیزر قابل تنظیم/طیف سنج	لیزرهای با طول موج ثابت
آشکار ساز	جریان یونی	جذب نور	هدایت الکتریکی
آماده سازی نمونه	زیاد	متوسط	کم
فاصله	خیر	خیر	بله
اندازه نمونه	متوسط	زیاد	کم
سرعت	متوسط	کم	زیاد
دقت	بالا	متوسط	بالا
کالیبراسیون	غیرپیوسته	غیرپیوسته	پیوسته
محدودیت‌ها	جزیی – هم فشار	شفافیت	جزیی

خیلی جالب است که به محدودیت‌هایی مانند دقت و اندازه نمونه توجه شود. بسیاری از اندازه‌گیری‌های نوری غیریکنواخت هستند که بدلیل الگوریتم غیرپیچیده طیفی و– یا منبع نور بکار رفته باعث محدودیت در دقت تا حد ۰/۵ می‌شود، حتی وقتی طول‌های بلند مسیر نور بکار گرفته شده است تا ویژگی‌های طیف ضعیف ایجاد می شود. LARA چنین محدودیتی ندارد چرا که در آن از لیزرهای با طول موج ثابت و فاصله از طریق شدت لیزر برای بیشتر ایزوتوپ‌های چسبنده رقیق در اندازه‌گیری پیل نوری استفاده می‌شود. روش GC/IRMS بدلیل عدم حساسیت به خطوط هم فشار و اثرات جزیی ممکن در آماده

سازی نمونه، انتقال و یونیزه شدن دارای محدودیت در دقت است. همچنین LARA به دلیل اثرات جزیی ناشناخته در تخلیه الکتریکی گاز دارای محدودیت است.

۳- کالیبراسیون و استانداردها

دستیابی به مقدار مطلق برای نسبت‌های ایزوتوپی ناشناخته بی‌نهایت دشوار است. برای کارهای آنالیزی یک استاندارد قابل ردیابی شبیه آنچه در مطالعات ایزوتوپ‌های ردیابی شونده انتظار می‌رود که نسبت به تغییرات با زمان مورد توجه هستند، مورد نیاز است. تکنیک‌های کالیبراسیون مختلف برای GC/IRMS مورد استفاده هستند، بیشتر اندازه‌گیری‌های متداول نمونه‌های استاندارد با نمونه‌های ناشناخته همپوشانی (INTERSPERSED) دارد. منابع دو یونی اغلب به گونه‌ای استفاده می‌شوند که از آلودگی‌های مضاعف ناشناخته و استاندارد اجتناب شود. گازهای استاندارد از آزمایشگاه‌های استاندارد ملی یا منطقه‌ای بصورت دوره ای برای تضمین کیفیت تجهیزات مورد استفاده در آنالیز فرستاده می‌شوند. همانطور که مورد نمونه‌های نامعلوم و نمونه‌های گازی استاندارد بصورت مخرب آنالیز می‌شوند و تغییرات برای یک استاندارد جدید می‌تواند تکمیل شود.
وضعیت محاسبه نسبت‌های ایزوتوپی به روش اندازه‌گیری LARA متفاوت است. قابل توجه اینکه پارامتر اندازه گیری شده مستقیما δ است. نسبت‌های استاندارد و ناشناخته بصورت مداوم اندازه‌گیری می‌شود و نمونه استاندارد می‌تواند در سلولهای ایزوله شده بین تجهیزات جابجا شود. ایده‌آل آنست که گاز استاندارد یک مخلوط مشخص گازی باشد مثلا ۳٪ گاز CO_2 در نیتروژن باشد. در غیر اینصورت کالیبراسیون باید با یک نمونه مشخص با نسبت ایزوتوپی در یک مخلوط گازی مشخص باشد. برای مدتها یک سری از نمونه‌های ناشناخته از منبع مشابه نظیر CO_2 خالص یا هوا یا هوای تنفسی برای کالیبراسیون براحتی استفاده می‌شد. به هر حال برای مقایسه نسبتهای ایزوتوپی CO_2 در مخلوطهای گازی متفاوت، اثرات جزئی در تخلیه الکتریکی باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. اندازه‌گیری با غلظت CO_2 با نمونه‌های مختلف با بزرگی‌های (حجم‌های) متفاوت انجام می‌شده است. یک وابستگی جزئی غلظت به پارامتر "دوتایی پیل نوری" در معادله ۱ وجود دارد و بنابراین فعالیت بیشتری روی کالیبراسیون برای نمونه‌هایی با غلظت‌های متفاوت و غلظت‌های گازی مورد نیاز است. یک نمونه استاندارد برای غلظت CO_2 و مخلوط گازی برای مقایسه روش LARA با GC/IRMS برای تطابق کالیبراسیون بین تجهیزات مطلوب است. هیچ اصلاحی برای نمونه‌های هم فشار با اندازه‌گیری LARA مورد نیاز نیست در حالیکه فاکتورهای اصلاحی تجربی در GC/IRMS مورد استفاده قرار گرفته است تا بتواند $^{12}C^{16}O^{17}O$ در غلظت $^{13}CO_2$ اندازه‌گیری نماید و باید حتما با حساسیت نمونه‌ها در نسبت‌های ایزوتوپی به روش LARA کنترل شود

٤- کاربردها

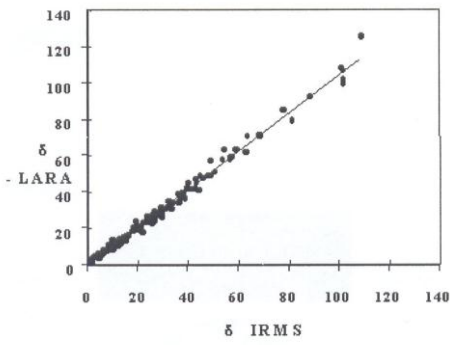
٤,۱: استفاده از لیزر برای نسبتهای آنالیزی در تنفس انسان

اولین کاربرد تجاری مورد استفاده به این روش برای امور درمانی، آنالیز ترکیبات ^{13}C نشان دار شده در هوای تنفس شده توسط انسان است. هوای تنفسی شامل ۵٪ گاز CO_2 ، با نیتروژن بعنوان گاز اصلی است که روش جایگزینی برای آنالیز پیل نوری بوسیله یک مخلوط گازی نمونه از تنفس طبیعی است، یا تنفس یک بیمار بعنوان استاندارد است. تنها آماده سازی نمونه

حذف بخار آب است، درصد آنچه که تغییرات بزرگی را در نمونه ها ایجاد می‌کند که سبب اثرات جزئی در تخلیه الکتریکی می‌شود.

تجهیزات متعددی در بیمارستان‌های ایالات متحده، کانادا و اروپا بکار گرفته شده است و هزاران تست تنفس انجام شده است و آنالیز شده است. سازمان‌های قانونی در امریکا (FDA) و اروپا (EMEA) استفاده از روش LARA را برای تشخیص عفونت در اوره تنفس تایید کرده‌اند. تکنسین‌های درمانی در استفاده از این سیستم بدلیل بالا و تشخیص احساس لذت دارند و با آن آسان کار می‌کنند.

در یک آزمایش طراحی شده برای مقایسه سیستم LARA با GC/IRMS برای آنالیز تنفسی، ۱۳۹ نمونه دوتایی از دو داوطلب بعد از نشان‌دار شدن به NaH13CO3 گرفته شد. اولین قسمت از نمونه‌ها از طریق LARA و دومین قسمت از طریق GC-IRMS آنالیز شدند. اصلاح عالی در شکل ۲ بدست آمده است. باید به این نکته توجه کرد که زمان اندازه‌گیری شده در روش GC/IRMS دو برابر زمان اندازه‌گیری شده به روش LARA است.



شکل ۲: ارتباط تجزیه و تحلیل LARA با تجزیه و تحلیل / IRMS GC پس از مصرف .NaH13CO3 شیب 1.038 ، رهگیری 0.016- و R2 0.992 است.

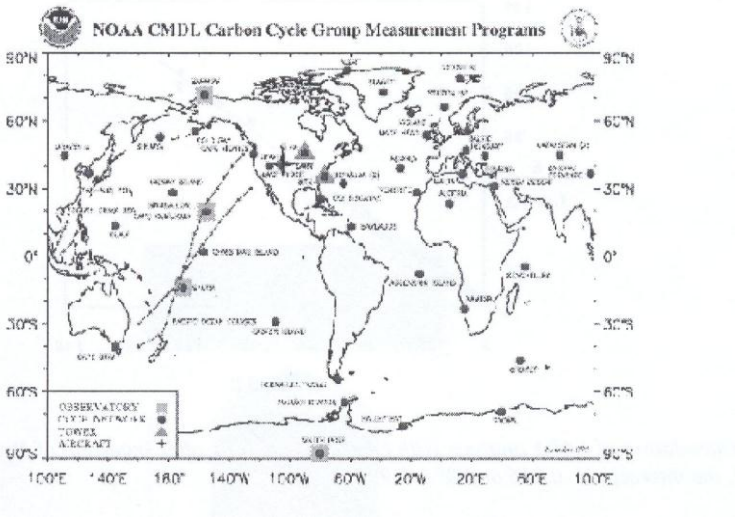
٤,۲: آنالیز CO_2 در اتمسفر

مطالعات گازهای اتمسفری، شیمی اتمسفری و بالانس جهانی کربن نیازمند اندازه‌گیری دقیق نسبتهای ایزوتوپی و تغییرات نسبتهای ایزوتوپی با زمان مخصوصاً برای کربن و اکسیژن در دی‌اکسیدکربن است. محققین و سیاستگزاران بدنبال این موضوع هستند که چرخه جهانی کربن را درک کنند و ایجاد محدودیت بر روی انتشار گازهای گلخانه‌ای به داده‌های کیفی زیاد روی شارهای کربن، منابع تولید و منابع مصرف هستند. در حالیکه نتایج برای غلظت CO_2 در اتمسفر به دقت و با افزایش ناظران در حال شناسایی و مونیتور شدن است مانند ایزوتوپ ^{13}C و^{14}C که بین حالت طبیعی و منابع غیر طبیعی(دخالت بشر) مانند احتراق و سوخت‌های فسیلی که نیازمند تشخیص است. بعلاوه سوال اینکه آیا کربن در یک مکان ذخیره می‌شود یا منتشر می‌شود ، مانند جنگلها، یک مسیر کلیدی برای توسعه کامل و فهرست کمی از میزان کربن است.

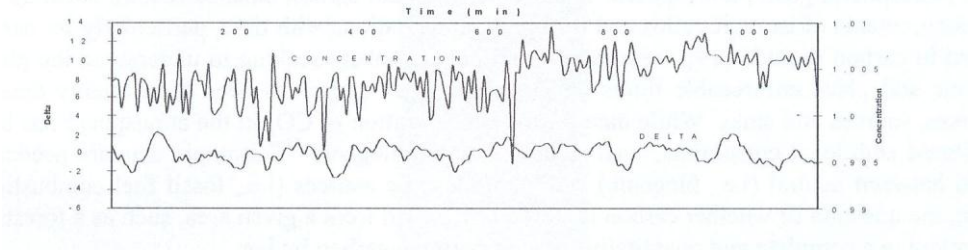
در حال حاضر، سازمان ملی هواشناسی و اقیانوس شناسی ایالات متحده شبکه عظیمی از سایت‌های نمونه‌برداری برای غلظت CO_2 را نگهداری می کند و آنالیز پایدار CO_2 در شکل ۳ نشان داده شده است. همه نمونه‌های هوا از این سایت‌ها جمع‌آوری می‌شوند و به آزمایشگاه مرکزی منتقل می‌شوند تا غلظت CO_2 و ترکیبات ایزوتوپی به دقت اندازه‌گیری شود. مجموعه شبکه مرکز ملی هواشناسی و اقیانوس شناسی از تعداد زیادی از ملیتها در اطراف دنیا تشکیل شده است که شامل ۴ مرکز دیده‌بانی با مرکزیت سازمان ملی، ۴۰ مرکز مشارکت، ۴ مرکز تجاری و ۲ سایت در برج‌های تجاری می‌باشد. این مجموعه محدود به تعدادی از نمونه‌ها می‌شود که می‌بایست آنالیز شوند و افزایش آنها پیچیدگی‌های لجستیکی و هزینه‌های آنالیز را بدلیل نقل و انتقال نمونه‌ها و مشابه اینها را به همراه خواهد داشت.

همانطورکه تنظیم غلظت مورد نیاز نیست و هوا می‌تواند بطور مداوم از طریق یک دمنده بدمد، روش LARA می تواند فرصتی برای تهیه اسناد آماده کند که نتایج روی ترکیب ایزوتوپ CO2 اتمسفری جمع‌آوری شود. در کارهای مقدماتی که در دانشگاه راجرز انجام شده است، تخلیه الکتریکی بوسیله دمش هوا از میان سلولها بهینه شده است بطوریکه سیگنالهای ناشی از هوای خارج از فرآیند با فاکتور ۱۰۰۰ در متوسط زمان به عنوان نویز تلقی شد. این سیستم می‌تواند برای روزها بدون وقفه کار کند. در شکل ۴ نتایج یک روز اندازه‌گیری‌های ممکن با دمش هوای خشک به دو سلول نمایش داده شده است.

همانطور که دیده می شود، دلتا متوسط،۰ (بعنوان نمونه‌های نامعلوم و استاندارد در یک هوا) نشان می‌دهد که انحراف از معیار کمتر از δ۱ است و انحراف غلظت آشکار در حد ناچیز PPM است. انحراف آشکار با زمان ممکن است بدلیل نوسان دما باشد که میتواند خنثی کننده انحرافات جریان، چسبندگی دیواره و اثرات جزئی دیگر باشد. بهبود در دقت را میتوان با افزایش برخی موارد مانند بهبود مهندسی جریان گاز، دمای سلول و متغیرهای مستقل دیگر انتظار داشت.



شکل .3 .توزیع جهانی از سایت های نمونه .CO2 NOAA



شکل ۴: اندازه‌گیری طولانی مدت غلظت CO_2 و $\delta^{13}C$ در هوای استاندارد خشک.

۵- جهت‌های مطالعاتی

همانطور که بیان شد تکنولوژی LARA یک روش بسیار جوان است و خیلی موارد برای یادگرفتن در آینده خواهد داشت و پتانسیل بالایی برای اکتشاف را ایجاد کرده است. توسعه رو به جلو برای ایجاد استانداردهای جدید و حد دقت مقایسه‌ای استاندارد نیز وابسته است. اندازه‌گیری جوی CO_2 و انحرافات زمانی با جریان از جمله حوزه‌های مورد مطالعه هستند. بعلاوه کربن و دیگر نسبتهای ایزوتوپی عنصری با استفاده از روش LARA یک روش مناسب بجای لیزر برای حساسیت و دقتی است که بدست آمده است. تحقیقات روی ایزوتوپ‌های اکسیژن، ایزوتوپ‌های نیتروژن و نسبتهای D:H نیز در برنامه تحقیقات قرار دارد.

درحال حاضر کار روی انالیز $^{18}O/^{16}O$ در دی اکسید کربن بر پایه مولکول $^{12}C^{18}O^{16}O$ در جریان است. در این حالت لیزر ایزوتوپی برای مولکول غیر متقارن در مقایسه با $^{13}C^{16}O_2$ بدلیل تعادل ایزوتوپی در تخلیه لیزر با ۵۰٪ ماکزیمم غلظت از مولکول مطلوب، قدری پیچیده است. مولکول مخلوط $^{12}C^{18}O^{16}O$ دارای دانسیته بالا در حالت مولکولی است و دارای تداخل باندهای لیزری با مولکول‌های متقارن است. در غیر اینصورت انتخاب یک انتقال مناسب در $^{12}C^{18}O^{16}O$ نزدیک 9.6 µm ، باعث بدست آمدن یک اثر قوی تک سیگنال پیل نوری روی ^{18}O میشود. بدلیل اثرات تبدیلی در حالت طبیعی $^{12}C^{16}O_2$ در تخلیه الکتریکی، حساسیت ^{18}O در غلظت‌های کمتر از $\%2CO_2$ در نیتروژن بسیار بزرگتر است. نتایج مشخص می‌کند که برای اندازه‌گیری نسبت‌های $^{18}O/^{16}O$ در CO_2 با نمونه‌های کمتر از ۱۰۰ NMOLES با دقت بالا (0.5δ) در کمتر از ۱ دقیقه انجام می شود. تحت وضعیت‌های مشخص، مخصوصا اگر بخار آب موجود باشد اثرات قابل توجهی شامل ^{18}O در تخلیه الکتریکی سلول میتواند مشاهده شود. این موضوع اصلا در مشاهدات اثرات قابل توجهی که در لایه‌های بالایی جو دیده می شود قابل توجه نیست.

روش تکنولوژی آنالیز ایزوتوپی LARA در حقیقت یک روشی را برای مطالعه واقعی در اثرات مختلف فراهم می کند، بعبارت دیگر سیگنالهای پیل نوری در نمونه‌های مختلف تخلیه الکتریکی شده میتواند بعنوان تابعی از زمان با دقت ده‌ها ثانیه با دمش در سلولها مورد مطالعه قرار گیرد. این سیستم‌ها می‌تواند برای مقایسه دقیق نمونه های بسیار کوچکتر از موارد مورد مطالعه توسعه یابد. سیستم‌های مشابهی برای $^{17}O:^{16}O$ میتواند توسعه یابد. بحث در جلساتی با موضوعاتی از این دست و

نیازمندی‌های مجموعه‌هایی که از این اطلاعات استفاده می‌کنند وشرکت‌های سرمایه‌گذار نرخ پیشرفت این تکنولوژی را تحت نظر دارند و تعیین می‌کنند.