

## مطالعه موضوع پیدایش حیات با محوریت واکنش فورموس برای سنتز کربوهیدرات‌ها

آرش وجود<sup>۱</sup>، محمد خدادادی مقدم<sup>۲</sup>، غلامرضا ابراهیم‌زاده رجائی<sup>۳</sup>، سحر مهاجری<sup>۲</sup>  
علی شامل<sup>۲</sup>

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

### چکیده

موجودیت‌های جان‌دار و بی‌جان به‌وضوح متفاوت‌اند، اما شیوه دقیق ارتباط‌یافتن این دو شکل از ماده به‌طریق آزردهنده دور از دسترس مانده است. از طرفی، نقش ویژه کربوهیدرات‌ها در پیدایش حیات یک حقیقت علمی مشهود و غیرقابل انکاری می‌باشد. از همین رو، مطالعات برای سنتز کربوهیدرات از طریق واکنش «فورموس» مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه سنتز پیش‌حیاتی کربوهیدرات‌ها با محوریت واکنش «فورموس» با روش توصیفی-تحلیلی می‌باشد. همچنین، اهمیت اصلی واکنش «فورموس» به نوعی با سناریوهای تکامل شیمیایی در ارتباط است که احتمالاً این سناریو در زمین پیش‌حیاتی رخ داده است تا نخستین مولکول‌های زیستی نظیر، کربوهیدرات، نوکلئیک اسید، آمینو اسید (واحدهای سازنده پروتئین‌ها) و هم‌چنین سایر مواد مهم را ایجاد کند و نیز ضرورت مطالعات در مورد این واکنش شیمیایی عموماً به قابلیت آن در سنتز کربوهیدرات‌ها برمی‌گردد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که واکنش «فورموس» در واقع همان تراکم آلدولی است که در محیط‌های قلیایی انجام می‌شود و نیز وجود کاتالیزور آن را تسریع می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که واکنش «فورموس» پایه واکنش‌های شیمیایی غیرزیستی تولید کربوهیدرات‌ها بوده و از نظر سیستم‌های شیمیایی، یک سیستم پیچیده است که از دو واکنش آهسته و سریع تشکیل یافته است.

**واژگان کلیدی:** پیدایش حیات، تکامل شیمیایی، واکنش فورموس، کاتالیزور، تراکم آلدولی، کربوهیدرات

<sup>۱</sup> گروه شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران، نویسنده مسئول، voojod.a2012@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

<sup>۳</sup> گروه شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران، نویسنده مسئول، farzad\_rajaei@yahoo.com

## مقدمه

هُوَ الْفَتْاحُ الْعَلِيمُ<sup>۱</sup>

از دیرباز انسان‌ها دربارهٔ چیستی و چرایی حیات می‌اندیشد و در صدد یافتن پاسخ این پرسش مهم بودند که ما چگونه و از کجا به وجود آمده‌ایم و در معنای گسترده‌تر، ظهور زندگی در سیارهٔ ما و شاید در جهان و نیز سرشت چیزهای زنده و رابطه‌شان با بی‌جان‌ها، چگونه بوده است؟ از آنجایی که منشأ حیات همواره رمز و رازی بزرگ بوده و آدمی را مبهوت خود ساخته است. از این رو، پی‌بردن به روند آغاز زندگی در سطح کره زمین یکی از جذاب‌ترین موضوعات برای مطالعه بوده و بی‌تردید به شناخت درست ما نیز از جهان هستی تأثیرگذار است. امروزه، تحقیقات دربارهٔ منشأ حیات، از زمینه‌های فعال در پژوهش‌های علمی است. این پژوهش‌ها در افزایش سطح دانش و آگاهی ما دربارهٔ چگونگی شکل‌گیری حیات اولیه بسیار اثرگذار بوده‌اند. دستیابی به درکی بهتر از چیستی حیات چه بسا تنها نگوید کی و چی هستیم، بلکه امیداست بینشی بزرگ‌تر از خود سرشت کیهان و پایه‌ای‌ترین قوانینش را برایمان فراهم سازد (پراس<sup>۲</sup>، ۱۳۹۶، تریپاتی<sup>۳</sup> و راماب هادران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷؛ لوپز<sup>۵</sup> و فیور<sup>۶</sup>، ۲۰۱۹؛ بیس کانس<sup>۷</sup>، ۲۰۱۸؛ فیور<sup>۸</sup>، ۲۰۱۹). ایضاً، در آیات متعددی از قرآن کریم این منبع جاوید و جامع و حیاتی به مسئله آغاز آفرینش جهان اشاره و در آن به مسائلی مانند چیستی و چگونگی جهان قبل از آفرینش، مواد اولیه سازنده جهان هستی و توسیع یا گسترش آسمان‌ها پرداخته شده است (کریمی و موسوی، ۱۳۹۶).

تحقیقات دانشمندان نشان داده است که حیات احتمالاً در نتیجهٔ فعل و انفعالاتی شیمیایی پیچیده به وجود آمده است؛ یعنی به عبارتی مجموعه‌ای از مواد شیمیایی باید، به مقدار و شکل مناسب، با هم ترکیب شده باشند تا موجود زنده به وجود بیاید (پچت‌هوروویتس<sup>۸</sup>، ۱۹۷۳؛ آمتا<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛

<sup>۱</sup> سیأ، آیه ۲۶<sup>۲</sup> pross<sup>۳</sup> Thripati<sup>۴</sup> Ramabhadran<sup>۵</sup> Lopez<sup>۶</sup> Fiore<sup>۷</sup> Biscans<sup>۸</sup> Paecht-Horowitz<sup>۹</sup> Ameta

وجود، ۱۴۰۰). از همین رو است که سرآغاز زندگی شیمیایی و بی‌حیات در نظر گرفته می‌شود. البته این فرضیه نیز جای تأمل دارد که شاید منشأ حیات از بی‌حیاتی است (وجود و همکاران، ۲۰۲۱؛ شعبانی، ۱۳۹۸). همچنین، زیست‌شناسان عموماً این فرضیه را که حیات از ماده غیرزنده تکامل یافته است، پذیرفته‌اند؛ اما این موضوع که دقیقاً این فرآیند که تکامل شیمیایی خوانده می‌شود، چگونه رخ داده است، بر ما آشکار نیست (آمتا و همکاران، ۲۰۲۱؛ اختیاری و فرجی، ۱۳۹۶؛ کرام‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۶). از طرفی، علم شیمی پیش‌حیاتی نیز بر آن است نقش اصلی خود را در تلاش میان‌رشته‌ای برای پیگیری موضوع منشأ زندگی ایفا کند و به این پرسش، پاسخ دهد که چگونه می‌توان مولکول‌های آلی پیچیده را از پیش‌سازهای ساده تشکیل داد. این شاخه از علم شیمی، سازوکارهای احتمالی را که در محیط‌های پیش‌حیاتی پیش می‌روند شرح می‌دهد. به طور کلی، مطالعه چگونگی سنتز پیش‌حیاتی کربوهیدرات‌ها در کره زمین که به نوعی هدف پژوهش حاضر را شامل می‌شود، موضوع این شاخه از دانش شیمی است (ایس چنوسر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷؛ کوپتزکی<sup>۲</sup> و آنتونی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱؛ پرز ویلا<sup>۴</sup>، پتریو سیاه<sup>۵</sup> و سآی تام<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰؛ بوتایا<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ مایر<sup>۸</sup>، ۲۰۲۰).

قندها در شیمی پیش‌حیاتی، اهمیت شایانی دارند، چراکه به عنوان سازنده بخشی از ساختار نوکلئوتیدها و نیز ترکیبات و بسترهای بالقوه برای متابولیسم‌های اولیه، به شمار می‌آیند (قریب و فائزی‌زاده، ۱۳۸۸؛ وبر<sup>۹</sup>، ۱۹۹۲؛ وجود و همکاران، ۲۰۲۱). به هر حال، اهمیت کربوهیدرات‌ها برای موجودات زنده و به ویژه نقش ویژه «ریبوز» به منزله آجر ساختمان اسید ریبونوکلیک (RNA)، زمینه‌ساز مطالعاتی در مسیرهای احتمالی برای سنتز قندها در وضعیت پیش‌حیاتی شده است. به طور کلی تصور می‌شود که سنتز پیش‌حیاتی قندها با واکنش «فورموس» مرتبط است و نیز این واکنش شیمیایی برای پرسش دربارهٔ سرمنشأ حیات اهمیت بسزایی دارد، چراکه مسیری بالقوه برای تولید

<sup>1</sup> Eschenmoser

<sup>2</sup> Kopetzki

<sup>3</sup> Antonietti

<sup>4</sup> Pérez-Villaa

<sup>5</sup> Pietruccia

<sup>6</sup> Saittam

<sup>7</sup> Botta

<sup>8</sup> Mayer

<sup>9</sup> Weber

مونوساکاریدهای پیچیده و پایه واکنش‌های شیمیایی غیرزیستی بوده و نیز یک فرآیند احتمالی برای تولید غیرزیستی قندها در نظر گرفته می‌شود (قریب و فائزی‌زاده، ۱۳۸۸؛ آبرومند، ۱۳۸۰؛ پجت‌هوروویتس، ۱۹۷۳؛ وبر، ۱۹۹۲؛ وبر، ۱۹۸۷؛ وبر، ۱۹۹۱؛ ویس<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۱؛ کوفوئد<sup>۲</sup>، ریموند<sup>۳</sup> و داربر<sup>۴</sup>، ۲۰۰۵).

نخستین گزارش‌های «الکساندر میخائیلوویچ باتلروف»<sup>۵</sup>، شیمیدان روسی در سال ۱۸۶۱ میلادی درباره تراکم فرمالدهید برای تولید مخلوط پیچیده کربوهیدرات‌ها در یک محیط قلیایی با کاتالیزور معدنی هیدروکسید کلسیم انتشار یافت. از همان زمان، واکنش «فورموس»، در موضوعات پژوهشی مهمی نظیر منشأ تشکیل زندگی آغازین از مونوساکاریدها و تولید صنعتی کربوهیدرات‌های خوراکی و غیره مورد توجه بوده است (عمران، ۲۰۲۰؛ میزارو<sup>۶</sup> و ویس، ۱۹۷۴؛ جال‌بأت<sup>۷</sup>، ۲۰۰۷؛ هارش<sup>۸</sup>، بایر<sup>۹</sup> و ولتر<sup>۱۰</sup>، ۱۹۸۴؛ کاستلز<sup>۱۱</sup>، لوپز کالاهورا<sup>۱۲</sup> و جآی جو<sup>۱۳</sup>، ۱۹۸۰؛ کاستلز، لوپز کالاهورا و جآی جو، ۱۹۸۳). بسیاری از ترکیبات معدنی و آلی نیز در این واکنش از خود فعالیت کاتالیزوری نشان می‌دهند. با وجود این، هیدروکسید کلسیم که نخستین بار «باتلروف» از آن استفاده کرد، مؤثرترین کاتالیزور این واکنش محسوب می‌شود (سیمونوف<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۷؛ دلی دوویچ<sup>۱۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

اهمیت اصلی واکنش «فورموس» به نوعی با سناریوهای قابل قبول تکامل شیمیایی در ارتباط است که این سناریو احتمالاً در زمین پیش حیاتی اتفاق افتاده است تا اولین مولکول‌های زیستی نظیر، کربوهیدرات، نوکلئیک اسید، آمینو اسید و هم چنین سایر مواد مهم ضروری را ایجاد کند. از طرفی،

<sup>1</sup> Weiss

<sup>2</sup> Kofoed

<sup>3</sup> Reymond

<sup>4</sup> Darbr

<sup>5</sup> Alexander Michailowitsch Butlerow

<sup>6</sup> Mizuro

<sup>7</sup> Jalbout

<sup>8</sup> Harsch

<sup>9</sup> Bauer

<sup>10</sup> Voelter

<sup>11</sup> Castells

<sup>12</sup> Lopez-Calahorra

<sup>13</sup> Geijo

<sup>14</sup> Simonov

<sup>15</sup> Delidovich

ضرورت مطالعات در مورد واکنش «فورموس» عموماً به قابلیت تولید قندها از طریق آن بر می‌گردد که در واقع بخش عظیمی از دنیا آلی را کربوهیدرات‌ها نسبت به سایر انواع مولکول‌های زیستی، تشکیل می‌دهند و یکی از فراوان‌ترین مواد وجود در طبیعت هستند و از مهم‌ترین منبع انرژی بشمار می‌آیند و نیز قسمت عمده کالری مورد نیاز موجودات زنده توسط آنها تأمین می‌گردند. همچنین، قندها از عوامل مهم در سنتز نوکلئوتیدها و بسیاری اسیدهای آمینه می‌باشند. بالاخره، تحقیقات نشان داده است که قندها جزء مواد اولیه دخیل در پیدایش حیات بوده‌اند (وجود و همکاران، ۱۳۹۹؛ والده<sup>۱</sup>، ۱۳۹۹؛ لی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹؛ گائینی و نوری، ۱۳۹۹؛ هاویل و کمندانی، ۱۳۹۹؛ لامبرت<sup>۳</sup>، گوروسوامی-تانگاولو<sup>۴</sup> و ما<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰؛ سهیلی لیراوی، ۱۳۹۹).

از آنجایی که سنتز پیش‌حیاتی قندها به واسطه واکنش «فورموس» بوده و نیز این واکنش به منزله مسیری ممکن برای تشکیل قند در شرایط پیش‌حیاتی در نظر گرفته شده است (اکهاردت<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ لامور<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ ایمای<sup>۸</sup>، میچیتاکا<sup>۹</sup> و هاشیزومه<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۶). به همین دلیل، واکنش «فورموس»، روشی کارآمد برای سنتز پیش‌حیاتی قندها به شمار می‌آید. از این رو، هدف اصلی موضوع مورد پژوهش نیز، مطالعه سنتز پیش‌حیاتی کربوهیدرات‌ها از طریق همین واکنش شیمیایی می‌باشد که بدین منظور، در مقاله حاضر سعی بر آن است که نخست به خوانندگان گرامی، تعریف دقیق و شناخت روشنی از موضوع پیدایش حیات و واکنش «فورموس» و نیز گزارشات کوتاهی از برخی تحقیقات انجام‌شده در مورد این واکنش شیمیایی در محدوده زمانی سال ۱۸۵۹ تا ۲۰۲۰ میلادی، ارائه شود تا نهایتاً تصویر جامعی از مفهوم روش «فورموس» برای سنتز پیش‌حیاتی قندها، حاصل گردد. همچنین، از روش کتابخانه‌ای در گردآوری اطلاعات نوشتار پیش‌رو، استفاده شده است.

<sup>1</sup> Walde

<sup>2</sup> Li

<sup>3</sup> Lambert

<sup>4</sup> Guruswamy-Thangavel

<sup>5</sup> Ma

<sup>6</sup> Eckhardt

<sup>7</sup> Lamour

<sup>8</sup> Imai

<sup>9</sup> Michitaka

<sup>10</sup> Hashidzume

## ۱- حیات

حیات به معنای زندگانی و زنده شدن و نیز وجه تمایز موجودات زنده از غیرزنده می‌باشد. حیات در اصطلاح، نیروی است که موجب بروز حس و تحرک در موجود زنده می‌شود و موجودات با آن خود را از نقض به کمال می‌رسانند که بعنوان یک فرآیند یک طرفه و برگشت‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. از طرفی، اعتقاد بر این است فرآینده تبدیل غیرزنده به زنده طی دو فاز شامل فاز شیمیایی (معمالگانه، مبهم و ناشناخته) و فاز بیولوژیکی انجام شده است. به هر حال تبدیل غیرحیاتی به حیاتی کماکان یک معما برای جامعه علمی است. همچنین، از نظر مذاهب مختلف حیات یا زندگی از مواد غیرزنده توسط نیرویی غیر طبیعی و غیرانسانی (خدا) به وجود آمده است. به این جهت در اکثر مذاهب حیات به مثابه یک مقوله مقدس دانسته شده است. به طور کلی، برای آفرینندگی و دقتی چنین واضح در حیات که از قدرت نامحدود خداوند متعال سرچشمه گرفته است، به نظر جز خیره کننده صفت دیگری را نمی‌توان برشمرد.

### ۱-۱- دو رویکرد متفاوت برای پیدایش حیات

#### ۱-۱-۱- رویکرد بالا به پایین

این رویکرد، بر این اساس استوار است که چون ساده‌ترین سلول‌های امروزی بسیار پیچیده هستند و از پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک زیادی تشکیل شده‌اند، احیاناً این پیچیدگی زیاد، مربوط به تکامل سلولی- مرحله پس از شکل‌گیری اولین حیات در سطح سلول- است و زمانی که حیات سلولی آغاز شده است، این تنوع زیاد پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک وجود نداشته است. هدف این رویکرد، یافتن کمترین تعداد پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک لازم برای سلول است، به طوری که سلول همچنان توانایی به انجام رساندن اساسی‌ترین فعالیت‌های حیاتی- نظیر تکثیر و پایداری- را داشته باشد. بنابراین، رهیافت بالا به پایین از چیزی که داریم شروع می‌کند و در تکاپوی فهمیدن شیوه مشارکت کردن اجزاء در کلیت، رو به پایین می‌رود. شایان ذکر است، بیشتر افرادی که بر غلبه سطح سلولی در مفهوم حیات پا فشاری می‌کنند، طرفدار رویکرد بالا به پایین که سطح سلولی را مورد توجه قرار می‌دهد، هستند.

#### ۱-۱-۲- رویکرد پایین به بالا

این رویکرد، جستجوی خود را برای یافتن نشانه‌هایی از مراحل ابتدایی حیات در اسناد زمین‌شناختی، بررسی‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری دنبال می‌کند. هدف بررسی‌های آزمایشگاهی - در یک دید کلی - شروع از مولکول‌های ساده و ابتدایی، افزایش تدریجی پیچیده‌گی عناصر و فرآیندهای موجود در سیستم و نهایتاً تولید ساده‌ترین سلول ممکن است. به عبارت دیگر، رهیافت پایین به بالا از سرآغازی فرضی شروع می‌کند و به سوی بالا پیش می‌رود. از طرفی، برخلاف زیست‌شناسی سیستم‌ها، که رهیافت بالا به پایین را در کوشش برای کلنجار رفتن با پیچیده‌گی حیات به کار می‌گیرد، شیمی سیستم‌ها رهیافت پایین به بالا را دنبال می‌کند (مسترجمی، ۱۳۹۴؛ شعبانی، ۱۳۹۸؛ حق‌شناس، انتخابی و سامعی، ۱۳۸۸؛ حاجی‌حیدری، ۱۳۹۳؛ آذرنوش، ۱۳۷۹؛ آوانسری، ۱۳۹۵؛ پراس، ۱۳۹۶). همچنین ناگفته نماند، بیشتر افرادی که بر جنبهٔ مولکولی حیات تأکید دارند، طرفدار رویکرد پایین به بالا که تمرکز خود را بر سطح مولکولی می‌گذارد، هستند (حاجیان‌فروشانی، ۱۳۸۴؛ وجود و همکاران، ۱۳۹۹؛ لوییسی<sup>۱</sup>، والده و اُبرهولزر<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹).

### ۱-۲- حیات در روی زمین و آغاز آن از مولکول‌های غیرزیستی

حیات با آنکه پدیده‌ای فوق‌العاده پیچیده است اما اصل آن به طرز شگفتی آوری ساده است. حیات تنها عبارت است از شبکه‌ی برآیندی واکنش‌های شیمیایی که چرخه‌ی پی در پی تکرار شدن، جهش، پیچیده‌گی‌یافتگی و گزینش، پدید می‌آید. در مدتی پس از شکل‌گیری منظومه‌ی خورشیدی خودمان در حدود ۴/۶ میلیارد سال پیش، حیات روی زمین از سرآغازهایی نازیستی به راه افتاد. بنابراین، باور داریم که حیات روی زمین از ماده‌ی بی‌حیات پدیدار شده است (شکل ۱).



شکل ۱. تبدیل دو فازی (شیمیایی و زیست‌شناسی) بی‌حیات به حیات پیچیده

<sup>۱</sup> Luisi

<sup>۲</sup> Oberholzer

حیات روی زمین از راه توان سینتیکی عظیم واکنش تکرارشدن، عمل‌کننده روی سیستم‌های تکرار شونده‌ای ناشناخته اما ساده، به ظاهر متشکل از مواد اولیگومری زنجیر مانند، RNA و RNA مانند، قادر به جهش و پیچیده‌گی‌یافتگی، پدیدار شد. تمام واکنش‌های شیمیایی در برگیرنده تبدیل نوعی ماده شیمیایی به نوعی ماده دیگر است و همه چیزهای زنده در برگیرنده واکنش شیمیایی‌اند، هزاران تا از آن‌ها و یاخته‌های زنده، یکای پایه سازنده همه حیات، مجموعه‌ای است پیچیده از این واکنش‌ها که به شیوه‌ای درون یک کل هماهنگ، یکپارچه شده‌اند. به نظر می‌رسد که در نخستین مراحل پیدایش حیات، مولکول‌های غیرزیستی با یکدیگر واکنش شیمیایی انجام می‌دادند. این واکنش‌ها باعث تولید تعداد و انواع زیادی مولکول‌های آلی ساده شدند. مولکول‌های ساده با استفاده از انرژی خورشید و گرمای حاصل از فعالیت‌های آتشفشانی، مولکول‌های پیچیده‌تری به وجود آوردند. شاید این مولکول‌های پیچیده واحدهای سازنده اولین سلول‌ها بوده‌اند (وجود و همکاران، ۲۰۲۱؛ رحیمی، ۱۳۹۸؛ کرام‌الدینی و همکاران، ۱۳۹۶، پراس، ۱۳۹۶؛ یزدیان، ۱۳۹۳).

شایان ذکر است، در زمین اولیه تنها دو منبع محتمل برای مواد آلی وجود داشته است. یکی از این احتمالات ورود مواد آلی بر اثر برخورد شهاب‌سنگ‌ها در دوران هادئن به زمین اولیه و احتمال دوم سنتز این مواد توسط فرآیندهای ژئوشیمیایی در اتمسفر و هیدروسفر زمین اولیه می‌باشد (والده، ۱۳۹۹). از طرفی، پالمان و همکاران در مقاله منتشر شده در سال ۲۰۱۸ گزارش کرده‌اند که نتایج حاصل از مطالعات‌شان نمونه ارتباط مواد خارج از کره زمین به شیمی پیش‌حیاتی بر روی زمین ابتدایی را، ارائه می‌دهد (پالمان<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).

متأسفانه زیست‌شناسان درباره جزئیات فرآیندهایی که منجر به تشکیل حیات شده‌اند، اتفاق نظر ندارند. با این وجود، اغلب دانشمندان این مطلب را قبول دارند که مولکول‌های کوچک آلی با کسب انرژی، از طریق فرآیندهای شیمیایی ساده، تشکیل شده‌اند. همچنین، از دید دانشمندان حیات بر روی زمین، نتیجه تعداد زیادی آزمایشات طبیعی است که طی آنها انواع مختلف مولکول‌های آلی با هم ترکیب شده و سیستم‌های فعال پیچیده‌ای را به وجود آورده است و تحت شرایطی، مواد آلی

<sup>1</sup> Pallmann



می توانسته‌اند اطراف ذرات معدنی جمع شوند تا واکنش‌های شیمیایی در این مخلوط آغاز گردد. طی این فرآیند، تکامل شیمیایی به صورت پیش‌رونده طی ده‌ها یا صدها میلیون سال بعد از سرد شدن زمین، رخ داده است (اختیاری و فرجی، ۱۳۹۶؛ رحیمی، ۱۳۹۸؛ پراس، ۱۳۹۶).

## ۲- تاریخچه مختصری برای واکنش فورموس و تحقیقات انجام شده بر روی آن

آقای «الکساندر میخائیلوویچ باتلروف» در سال ۱۸۵۹ میلادی فرمالدهید (که در ابتدا دی‌اکسی متیلن/متیلن دی‌اکسید نامیده می‌شد) را کشف کرد. دی‌اکسی متیلن پلیمر فرمالدهید (پارافرمالدهید) است. همچنین، فرمالدهید در سال ۱۸۶۹، توسط شیمیدان آلمانی آقای آگوست ویلهلم فون هافمن<sup>۱</sup>، به طور قطعی با فرمول مولکولی  $\text{CH}_2\text{O}$  شناسایی شد. پلیمریزاسیون فرمالدهید، در حضور کاتالیزورهای معدنی ساده برای تشکیل مخلوطی از قندها - واکنش «فورموس» - که در ابتدا در قرن نوزدهم کشف شده است. براین اساس، برای نخستین بار در سال ۱۸۶۱ میلادی، شیمیدان روس آقای «باتلروف» متوجه تشکیل مواد قندی طی واکنش فرمالدهید با یک ترکیب قلیایی ضعیف شد و توانست واکنش «فورموس» (که به واکنش «باتلروف» نیز معروف است) را کشف کند. ایشان در آزمایش اصلی خود، محلولی از دی‌اکسی‌متیلن مخلوط با آهک زنده  $(\text{OH})\text{Ca}$  را گرم کرد. این محلول رنگی شد و بوی شیرین شکر سوخته داشت، بنابراین این محلول را مزه کرد و متوجه شد که مانند شکر شیرین است. لذا، واکنش «فورموس»، از همان ابتدای کشف اش، با تولید شکر مترادف بوده است (میرزایی و همکاران، ۱۳۸۴؛ وجود و همکاران، ۲۰۲۱؛ وجود و همکاران، ۱۳۹۹؛ عمران و همکاران، ۲۰۲۰؛ عمران، ۲۰۲۰).

همانطور که گفته شد، پس از کشف واکنش «فورموس» در سال ۱۸۶۱ میلادی مطالعات متعددی در مورد آن توسط محققان انجام شده و در منابع علمی گزارش شده است. چرا که این واکنش از دید بسیاری از دانشمندان یک گزینه مطلوب برای سنتز پیش‌حیاتی قندها به شمار می‌آید. در ادامه سعی بر آن است که به اجمال به برخی از این تحقیقات تجربی انجام شده بر روی این واکنش شیمیایی اشاره شود.

<sup>1</sup> August Wilhelm von Hofmann

آقای برسلو<sup>۱</sup> در پژوهشی در سال ۱۹۵۹ میلادی به مطالعه مکانیزم واکنش «فورموس» و به بحث در مورد وجود دو فرآیند، برای رخ دادن تراکم فرمالدهید شامل تراکم مستقیم آهسته و واکنش سریع و استفاده از کاتالیست در مکانیزم «فورموس» و موارد دیگر، پرداخته است (برسلو، ۱۹۵۹). در کار پژوهشی دیگر، آقای آکرلوف و میشل در سال ۱۹۶۳، متوجه شدند که محلول غلیظ تهیه شده از قندهای فورموسی منبع کربنی فقیری برای تولید مایهٔ خمیر نانویی است (ویس، ۱۹۸۱).

گزارش شده است که مخلوط «فورموس» برای حیوانات سمی است (شاپیرا<sup>۲</sup>، ۱۹۶۷). در حقیقت، مخلوط‌های «فورموس»، به دلیل وجود مقادیر زیاد کربوهیدرات‌های زنجیری شاخه دار شدیداً سمی هستند (کاستلز، لوپز کالاهورا و جآی جو، ۱۹۸۳). در یکی از گزارشات هنگامی که میزارو و همکارانش قند فورموسی را جایگزین ۵۰ درصد از رژیم غذایی روزانهٔ موش‌های صحرایی بالغ کردند، وزن موش‌ها به طور خطی در طول زمان کاهش یافته و تمام آنها به اسهال شدید، کیست‌های روده‌ای و ناهنجاری‌هایی در سایر اعضا بدن‌شان مبتلا گردیده و از بین رفتند. این محققان نتیجه‌گیری کردند که قندهای مخلوط «فورموس» سمی‌اند و برای کشتن موش‌های صحرایی حتی در مقادیر ۵۰ درصد خوراک معمول‌شان، کافی می‌باشند (یاماشیتا<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۲؛ ویس و همکاران، ۱۹۸۱؛ میزارو و ویس، ۱۹۷۴).

کاری لو<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۱۹۷۷ میلادی، مشاهده کردند که با افزایش مقادیر کمی از گلیکول آلدهید و گلیسر آلدهید (محصولات اولیه واکنش «فورموس») به محلول واکنش «فورموس»، سرعت واکنش افزایش می‌یابد (مینی خالدی، ۱۳۷۰).

زیمکیس<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۱۹۷۷ میلادی، مطالعات اسپکتروسکوپی کمپلکس فعال و نیز اثر آن در واکنش «فورموس» را انجام دادند (زیمکیس و همکاران، ۱۹۷۷).

آقای شی جی ماسا<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۹ میلادی، به مطالعهٔ اثرات حلال در واکنش «فورموس» پرداختند. برای مثال، گزارش شده است که افزودن متانول، ۲- پروپانول و تتر

<sup>1</sup> Breslow

<sup>2</sup> Shapira

<sup>3</sup> yamashita

<sup>4</sup> Krylov

<sup>5</sup> Ziemecki

<sup>6</sup> Shigemasa

هیدروفوران، واکنش «فورموس»، بخصوص دوره «انگیزی»<sup>۱</sup> را تسریع می کند و اما اتیلن گلیکول و گلیسرول خلاف این بوده و به عبارتی دیگر تأثیر باز دارنده در واکنش «فورموس» دارند. علاوه بر این، متانول در افزایش محصول واکنش فورموسی با محدود کردن واکنش جانبی «کانیزارو» فرمالدهید، تأثیر دارد. این محققان واکنش «فورموس» را در متانول ۱۰۰ درصد و ۹۰ درصد بطور کامل مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که، همی استال<sup>۲</sup> ( نیم استال) فرمالدهید برای واکنش «فورموس» در حلال‌های الکلی غیر آبی ضروری است و همچنین، رقابت میان واکنش «کانیزارو»، تشکیل قند و واکنش‌های تجزیه شکر، فاکتورهای تأثیرگذار مهمی بر محصول قند است (زویچک مایر<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ وجود، ۱۴۰۰؛ شی جی ماسا، ۱۹۷۹).

آقای اُسکار لُوئو<sup>۴</sup>، که در اواخر دهه ۱۸۸۰ میلادی واکنش «فورموس» را بهبود بخشید و فرم «کلاسیک» این واکنش را ارائه داد و نیز پیشنهاد داد که «فورموس» می‌تواند سوربوز باشد، که ایزومری از فروکتوز است. در ادامه، آقایان فیشر<sup>۵</sup> و بائر<sup>۶</sup> پلیمریزاسیون گلیسرالدهید و یا دی‌هیدروکسی‌استون را برای تولید سوربوز و فروکتوز کشف کردند، که منجر به پیشرفت درک مدرن ما در طی اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی شد (عمران و همکاران، ۲۰۲۰). این واکنش در طی دهه‌های ۱۹۶۰، ۷۰ و ۸۰ میلادی بدون پیشرفت چشمگیر در تولید کربوهیدرات‌های خوراکی به دلیل پیچیدگی بسیار بالا واکنش و سمیت محصول مورد بررسی قرار گرفته است (پچت‌هوروویتس، ۱۹۷۳؛ اقبال<sup>۷</sup> و نوولین<sup>۸</sup>، ۲۰۱۱).

در یک کار تجربی دیگر آقای مبینی خالدی محقق پرتلاش ایرانی در سال ۱۳۷۰ هجری شمسی، اقدام به سنتز پلی‌آل‌ها از طریق واکنش «فورموس» نمودند و نیز جهت جداسازی و شناسایی پلی‌آل‌های سنتز شده از روش‌های کروماتوگرافی مایع با کارایی بال<sup>۹</sup> (HPLC)، و جهت اثبات نتایج بدست

<sup>1</sup> Induction period

<sup>2</sup> Hemiacetal

<sup>3</sup> Zweckmair

<sup>4</sup> Oskar Loew

<sup>5</sup> Fischer

<sup>6</sup> Baer

<sup>7</sup> Iqbal

<sup>8</sup> Novalin

<sup>9</sup> High Performance Liquid Chromatography

آمده با HPLC، از روش‌های اسپکتروسکوپی IR، UV استفاده کردند. برای نمونه، محلول‌های «فورموس» سنتز شده به کمک کاتالیست نیکل رانی به مقدار مشخص تحت فشار ۵۰-۱۰۰ و دمای ۱۳۰-۱۰۰ و pH=8.5 هیدروژنه شده و پلی‌آل‌های حاصل با روش‌های UV، HPLC، IR شناسایی کمی و کیفی شدند. نهایتاً به این نتایج رسیدند: اولاً، با انتخاب شرایط مناسب دما، پی‌اچ، نوع و مقدار کاتالیست و کوکاتالیست، فرمالدهید صنعتی بدون رقیق کردن قابل تبدیل به «فورموس» است. دوماً، از آنجایی که تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند، نوع و مقدار کاتالیست و کوکاتالیست اهمیت زیادی در سنتز «فورموس» و سلکتیویته آن داراست. بهترین نتیجه حاصل با کاتالیست استات سرب و کوکاتالیست گلوکز بدست آمد که باعث حذف پرپود القائی واکنش «فورموس» گردید. سوماً با توجه به تحقیقات انجام گرفته هیدروژناسیون قندها تنها در محلول‌های بسیار رقیق نتیجه‌بخش بوده است. ولی در پژوهش با محلول «فورموس» ۲۰-۱۵ درصد نتایج بسیار خوبی بدست آمد که می‌تواند بعنوان یکی از پارامترهای اقتصادی بودن این طرح ارزیابی گردد (مبینی خالدي، ۱۳۷۰).

آقای وِبر در مقاله‌ای در سال ۱۹۹۲ میلادی، اشاره کرد که با توجه به اینکه مطالعاتی پیش حیاتی در پی اچ خنثی از آلومین، کائولینیت و کربنات-آپاتیت با در نظر گرفتن سنتز قند از فرمالدهید در دمای ۸۰-۱۰۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است، در این مقاله به بررسی اثر کاتالیست Fe(OH)O در سنتز هگزوزها از گلیسر آلدهید در PH خنثی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد پرداخته شد و بعد از ارزیابی اهمیت کاتالیست Fe(OH)O مشخص شد که این کاتالیست تراکم ۲۵ میلی مولار DL- گلیسر آلدهید را به کتوهگزوز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (pH 5-6) در حد موثر و بالایی کاتالیز می‌کند. در این مقاله، کاتالیز توسط کاتالیست معدنی به منظور سنتز قندهای پیش‌حیاتی، قابل قبول‌تر ارزیابی شد (پجت‌هوروویتس، ۱۹۷۳؛ وِبر، ۱۹۹۲).

آقای لامبرت و همکاران در سال ۲۰۱۰ میلادی، به این نتایج رسیدند که با توجه به اینکه مواد معدنی سیلیکات، جزء تشکیل دهنده اصلی پوسته و قشر زمین، همچنین جزء سازنده ماه، سیارک‌ها و سایر سیارات سنگی هستند، استفاده از سیلیکات باعث رفع یکی از موانع اولیه در نقش احتمالی واکنش «فورموس» در سنتز قند پیش‌حیاتی، یعنی ناپایداری محصول قندی می‌شود و باعث تثبیت قندهای تشکیل شده در واکنش «فورموس» می‌گردد. براین اساس مخلوط واکنش، تحت شرایط

«فورموس» کلاسیک در غیاب سیلیکات به سرعت تجزیه می‌شود و نیز این سنتز سیلیکات‌های قند توسط روش از پایین به بالا، احتمالاً یک فرآیند پیش حیاتی است. همچنین گزارش کردند که یون‌های سیلیکات تشکیل و تثبیت قندهای چهار و شش کربنی از قندهای ساده را کاتالیز می‌کنند و یک مسیر پیش حیاتی احتمالی را برای سنتز قندهای مهم بیولوژیکی پیشنهاد می‌کنند (لامبرت، گوروسوامی-تانگاولو و ما، ۲۰۱۰؛ کیم<sup>۱</sup> و بنر<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰). علاوه بر این، در پژوهشی دیگر، آقای لامبرت و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی، نقش سیلیکات در سنتز قندها تحت شرایط پیش حیاتی را مورد مطالعه قرار دادند و به معرفی و شرح مکانیسم واکنش «فورموس» پرداختند و به این نتیجه رسیدند که قندهای حاصل از این مکانیسم فورموسی خیلی متنوع و ناپایداراند. همچنین به اهمیت کاتالیست سیلیکات سدیم تأکید کردند. مثلاً تحت شرایط استاندارد «فورموس»، الیگومرها به سرعت تجزیه می‌شوند. بطوری که ظرف مدت ۱۲ ساعت محصول کمی از قند باقی می‌ماند. اما هنگامی که واکنش در حضور سیلیکات سدیم بعنوان کاتالیست انجام می‌گیرد محصولات C<sub>6</sub> صرفاً تولید می‌شوند و تقریباً بدون تغییر ظرف همان ۱۲ ساعت یا بیشتر پایدار می‌مانند (لامبرت، گوروسوامی-تانگاولو، ۲۰۱۴).

آقای عمران و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی، مقاله‌ای با عنوان واکنش «فورموس» قلیایی پیچیده و پیوند آن با متابولیسم منتشر کردند. در این پژوهش، بعد از ارائه تاریخچه‌ای مختصر برای واکنش «فورموس» و تشریح ارتباط آن با شیمی پیش حیاتی به مطالعه این واکنش تحت شرایط قلیایی و نیز پیوند آن را با متابولیسم پرداختند. همچنین، گزارش کردند، که محلول‌های فرمالدهید، هنگامی که در شرایط قلیایی گرم می‌شوند، زرد رنگ می‌شوند. این زرد شدن به دلیل تولید قندها از فرمالدهید رخ می‌دهد و با پیشرفت این واکنش، این محلول قهوه‌ای رنگ می‌شود، که نشانه‌ای از این است که فرمالدهید به طور کامل مصرف شده است و برخی از قندها به قطران تجزیه شده‌اند (عمران و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش تجربی دیگر توسط وجود و همکاران در سال ۱۳۹۹ هجری شمسی، واکنش «فورموس» در یک محیط آبی با هدف تولید پلی‌أل‌ها در حضور دو کاتالیست ناهمگن فیومد سیلیکا<sup>۳</sup> و مونت موریلونیت<sup>۱</sup> و در پی‌اچ‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، محصولات

<sup>1</sup> Kim

<sup>2</sup> Benner

<sup>3</sup> Fumed Silica

مشاهده شده در محیط این واکنش شامل ۱و۲-اتان دیول (اتیلن گلیکول) و ۲و۳-دی هیدروکسی پروپانال (گلیسرآلدهید) بودند. نهایتاً بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که کاتالیزور معدنی فیومد سیلیکا گزینهٔ بهتری برای استفاده به عنوان کاتالیزور در واکنش «فورموس» در مقایسه با کاتالیزور ناهمگن مونت موریلونیت می‌باشد. از این رو، در این پژوهش تجربی در مقایسه با برخی از پژوهش‌های گزارش شدهٔ مذکور، برای نخستین بار به منظور افزایش قابلیت گزینش‌پذیری واکنش «فورموس» با هدف تولید پلی‌ال‌های پیش‌حیاتی، از دو کاتالیزور معدنی فیومد سیلیکا و مونت موریلونیت، استفاده شد و نهایتاً مولکول‌های اتیلن گلیکول و گلیسرآلدهید ( $C_3H_6O_3$ ) تولید شدند. همچنین، برای اولین بار جذب این گلیسرآلدهید (قند ساده) تولیدی بر روی لایه مونت موریلونیت کلسیم‌دار به فرمول شیمیایی  $Al_2Ca_{0.5}O_{12}Si_4$  و متشکل از  $5 \times 5 \times 2$  سلول واحد (به ترتیب در جهات X و Y و Z) توسط روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت (وجود و همکاران، ۲۰۲۱؛ وجود، ۱۴۰۰). تقریباً تفاوت اصلی این تحقیق محاسباتی با تحقیقات آقای بطوری لیو و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی و تحقیقات آقایان گرت هاوس و سی جن در سال ۲۰۰۵ میلادی که به ترتیب از روش شبیه‌سازی MD<sup>۳</sup> به منظور مطالعهٔ جذب، جذب شونده‌های بنزین<sup>۴</sup> و اورانیل<sup>۵</sup> (VI) بر روی مونت موریلونیت (جاذب معدنی) استفاده کردند، می‌تواند تنها در انتخاب نوع جذب شونده باشد (لیو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ گرت هاوس<sup>۶</sup> و سی جن<sup>۷</sup>، ۲۰۰۵).

## ۲-۱- جایگاه محتمل برای واکنش فورموس

یک جایگاه محتمل برای واکنش «فورموس» در زمین ممکن است در دوران هادئن<sup>۸</sup>، ۴ تا ۴/۵ میلیارد سال پیش، وجود داشته است. در آن زمان، زمین به هم پیوسته بود و سرد شده بود و به یک جهان آتشفشانی با اتمسفر ضخیم غنی از دی اکسید کربن و اقیانوس آبی ناشی از رها شدن گازهای

<sup>۱</sup> Montmorillonite

<sup>۲</sup> Molecular Dynamic Simulation

<sup>۳</sup> Benzene

<sup>۴</sup> Uranyl

<sup>۵</sup> Liu

<sup>۶</sup> Greathouse

<sup>۷</sup> Cygan

<sup>۸</sup> Hadean

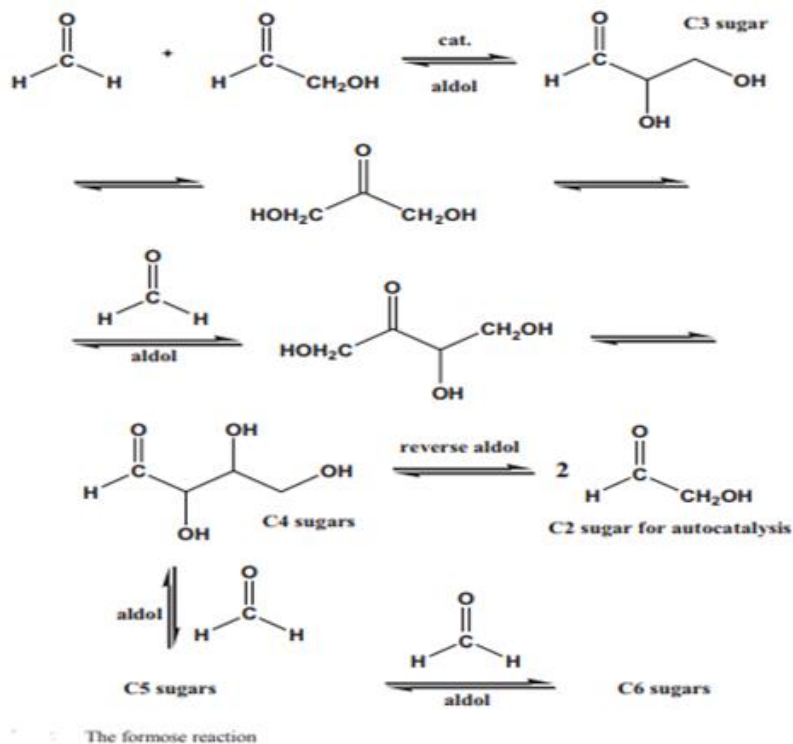
آتشفشانی تبدیل شد. شواهد زمین‌شناسی از زیرکن‌ها<sup>۱</sup> (سیلیکات زیرکونیوم) نشان داده‌اند که آب مایع ممکن است به قدمت ۴/۴ میلیارد سال پیش، اندکی پس از تشکیل زمین، وجود داشته است. فرمالدهید و گلیکول آلدهید ممکن است توسط شهاب‌سنگ‌ها، به خصوص در دوره بمباران شدید، به زمین وارد شده باشند. این فرضیه را مطالعات اخیر در مورد فراوانی فرمالدهید در فضای بین-ستاره‌ای، دنباله‌دارها، و ذرات گرد و غبار میان-سیاره‌ای تایید می‌کنند. علاوه بر این، شواهدی در مورد تولید فوتوشیمیایی و الکتروشیمیایی فرمالدهید در اتمسفر مملو از دی‌اکسید کربن دوران اولیه زمین وجود دارند. وجود منابع فرمالدهید، بازه‌های دمایی ایده‌آل و پی‌اچ مناسب در دوران اولیه زمین و سایر محیط‌های منظومه شمسی، شرایط انجام واکنش «فورموس» را فراهم می‌کند (وجود، ۱۴۰۰؛ عمران و همکاران، ۲۰۲۰؛ والده، ۱۳۹۹).

## ۲-۲- شیمی واکنش فورموس

زمانی که یک محلول آبی فرمالدهید با یک باز قوی مانند هیدروکسید کلسیم مخلوط می‌شود، یک سری واکنش‌های گرم‌زای خودکاتالیزوری مشاهده می‌شود. محصول واکنش فرمالدهیدی، مخلوطی است که بیشتر متشکل از کربوهیدرات‌های با دامنه تعداد کربنی ۴ الی ۷، و اکثراً قندهای ۶ کربنی می‌باشند. این شبکه از واکنش‌ها به نام واکنش «فورموس» شناخته می‌شود و این واکنش ترکیب پیچیده‌ای از قندها و الکل‌های قندی است که با کاتالیزوری بازی از بسپارش (پلی‌مری شدن) تراکمی فرمالدهید و طبیعت پیچیده‌ای که دارد، تولید می‌شود (وجود و همکاران، ۱۳۹۹). به عبارت دیگر می‌توان عنوان کرد که واکنش آقای «باتلروف» شکل ۲، بعنوان واکنش «فورموس» معرفی شده، به این صورت که از طریق این واکنش، فرمالدهید به قندها تبدیل می‌شود و درباره مکانیسم «باتلروف» گفته می‌شود که؛ فرمالدهید (C<sub>1</sub>) به تنهایی قادر به انجام واکنش آلدولی نیست و نیاز به حضور کاتالیزور گلیکول آلدهید (C<sub>2</sub>) دارد. محصول تراکم آلدولی C<sub>1</sub> و C<sub>2</sub> گلسیر آلدهید (C<sub>3</sub>) است. همچنین، مونوساکارید C<sub>4</sub> آلدوز با یک تراکم آلدولی معکوس دو مولکول کاتالیست اصلی C<sub>2</sub> را تولید می‌کند. بنابراین، محصولات واکنش کاتالیست خود را تولید می‌کنند (خودکاتالیزوری). علاوه بر این، محصول C<sub>4</sub>، می‌تواند به مولکول‌های دیگری از فرمالدهیدها اضافه شده و محصولات C<sub>5</sub> را تولید

<sup>1</sup> Zircons

کنند و دوباره این محصول C5، می‌تواند متراکم شده و محصولات C6 را حاصل نمایند. از این رو، این محصولات بسیار ناپایدار و متنوع‌اند و نیز بسیار سریع تشکیل می‌شوند.



شکل ۲. واکنش فورموس (وجود و همکاران، ۱۳۹۹؛ لامبرت و گوروسوامی-تانگاولو، ۲۰۱۴؛ کوپر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ گاهلاوت<sup>۲</sup> و پرن جوسی<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱؛ فنگ ترن<sup>۴</sup>، آدام<sup>۱</sup> و فارنباخ<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱؛ استوین<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۹)

<sup>1</sup> Cooper

<sup>2</sup> Gahlaut

<sup>3</sup> Paranjothy

<sup>4</sup> Phuong Tran



در ادامه شایان ذکر است که واکنش‌های اصلی تشکیل قندهای «فورموس» شامل واکنش «افزایش اولیه» و واکنش «کراس آلدولی شدن» می‌باشد. واکنش اولی میان دو مولکول فرمالدهید در جهت ایجاد گلیکول آلدهید عمل می‌کند و واکنش دوم بین مواد حدواسطی که از مرحله اول سنتز شده‌اند انجام می‌گیرد. ادغام این دو نوع واکنش منجر به تشکیل مولکولهای بزرگتر مثل پنتوزها و هگزوزها می‌شود. به عبارت دیگر، فرآیند «فورموس» مجموعه‌ای از دو واکنش است، اولین واکنش شامل یک مرحله آهسته است دومین واکنش، سریع و خودکاتالیزی بوده و شامل تشکیل تعداد زیادی از آلدوزها و کتوزهای سنگین‌تر از گونه‌های سبک‌تر است (پچت‌هوروویتس، ۱۹۷۳؛ عمران و همکاران، ۲۰۲۰).

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

تحقیقات نشان داده است که کماکان تبدیل بی‌حیات به حیات یک مسئله علمی معماوار و پیچیده و نیز کمابیش درک‌نشدنی است (شعبانی، ۱۳۹۸؛ تریپاتی و راماب هادران، ۲۰۱۷). از همین رو، پژوهش حاضر، این تبدیل را حرکتی آهسته و پویای ماده بی‌جان، از جهان شیمی (نازیستی) به سمت جهان زیست‌شناسی (جاندار) توصیف می‌کند. همچنین، این توصیف ساده در اغلب پژوهش‌های گزارش شده در قسمت دوم (تاریخچه مختصری...) این نوشته، مشاهده نمی‌شود.

برای پیدایش حیات دو رویکرد بالا به پایین و پایین به بالا در نظر گرفته می‌شود (پراس، ۱۳۹۶). از این رو، سرآغاز حیات بنا به فرض در این مقاله در ماده بی‌جان بوده است، یعنی حیات از بی‌حیات پدید می‌آید. در این صورت الزاماً باید سرآغازهای حیات ساده بوده باشند و پیچیدگی‌اش در دوره زمانی طولانی، گام‌به‌گام، ساخته شده باشد. همین امر، به‌خودی‌خود، مزیتی کلیدی به رهیافت پایین به بالا می‌بخشد. این پژوهش همسو با برخی از پژوهش‌های گزارش شده مذکور در بخش دوم پژوهش حاضر، رویکرد پایین به بالا در پیدایش حیات را دنبال می‌کند و پیشنهاد می‌شود باز در مطالعات آتی به آن رویکرد توجه شود.

<sup>1</sup> Adam

<sup>2</sup> Fahrenbach

<sup>3</sup> Stovbun

نقش قندها در پیدایش حیات بسیار مهم و انکارناپذیر است. بنابراین، در این مطالعه تلاش شد شرح و تصویر روشنی از روش «فورموس» برای سنتز قندهای پیش‌حیاتی ارائه شود. همچنین، در تحقیق وجود و همکاران و پژوهش مبینی خالدی به سنتز پلی‌آل‌ها از طریق واکنش «فورموس» در حضور کاتالیزور و سایر شرایط اعمال شده نظیر، دما، پی‌اچ و... (وجود و همکاران، ۲۰۲۱؛ مبینی خالدی، ۱۳۷۰) یا در تحقیق ویس و همکاران به استفاده از قندهای فورموسی برای سرکوب تورمورهای سرطانی و... پرداخته شده است (ویس و همکاران، ۱۹۸۱). در حالی که، در این مطالعه تنها به طور اجمالی به ارائه توضیحات شفاف و کاملی در مورد واکنش «فورموس» و نیز گزارشاتی از برخی تحقیقات انجام شده در مورد این واکنش، اکتفا شده است.

فرآیند «فورموس» متشکل از دو واکنش آهسته و سریع است (عمران، ۲۰۲۰) و نیز پایه واکنش‌های شیمیایی غیرزیستی تولید قندها شناخته می‌شود (وجود و همکاران، ۲۰۲۱). این واکنش احتمالاً سرمنشأ تشکیل قند پیش‌حیاتی در کره زمین است.

واکنش «فورموس» در محیط‌های آبی و غیرآبی مانند الکل‌ها قابل انجام است. برای مثال، در پژوهش شی جی ماسآ و همکاران اثرات حلال را در واکنش «فورموس» مورد مطالعه قرار دادند (شی جی ماسآ و همکاران، ۱۹۷۹) یا وجود و همکاران در محیط تماماً متانولی اقدام به سنتز مونوساکارید گلیسرآلدئید از طریق واکنش «فورموس» در حضور کاتالیزور ناهمگن فیومد سیلیکا کردند (وجود و همکاران، ۲۰۲۱).

سیستم «فورموس»، از نظر سیستم‌های شیمیایی، بسیار سیستم پیچیده ارزیابی می‌شود.

از بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه واکنش «فورموس» این گونه استنباط می‌شود که: اولاً این واکنش تحت تأثیر عوامل زیادی در محیط پیرامونش، مانند دما، درجهٔ قلیایی بودن، نوع حلال و نوع کاتالیزور است. دوماً، انجام این واکنش در حضور کاتالیزورهای مختلف معدنی، بسیار با اهمیت بوده و نتایج مطلوب و ارزنده‌ای را به دنبال خواهد داشت. برای یک نمونه، در تحقیق وجود و همکاران از طریق واکنش «فورموس» در حضور کاتالیزور معدنی مونت موریلونیت، با موفقیت مولکول‌های گلیسرآلدئید و اتیلن گلیکول سنتز شدند (وجود و همکاران، ۲۰۲۱).

این تحقیق در قیاس با برخی از تحقیقات گزارش شده در بخش دوم مقاله حاضر، مطالب جامع‌تری را در مورد واکنش «فورموس» در اختیار خواننده‌گان قرار می‌دهد. برای مثال، آقای لامبرت و

همکاران، نقش سیلیکات را در سنتز قندها تحت شرایط پیش حیاتی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند (لامبرت و همکاران، ۲۰۱۴) یا آقای برسلو در پژوهشی دیگر به مطالعه مکانیزم واکنش «فورموس» پرداخته است (برسلو، ۱۹۵۹). در حالی که در این پژوهش علاوه بر ارائه مطالب کامل تری در مورد تاریخچه، شیمی و مکانیزم واکنش «فورموس» در مقایسه دو تحقیق مذکور، مختصراً به موضوع مهم حیات و پیدایش آن در سطح سیاره زمین نیز، پرداخته شده است.

### پیشنهادات برای فعالیتهای پژوهشی بعدی

با در نظر گرفتن کار پژوهشی وجود و همکاران که از طریق واکنش «فورموس» در حضور کاتالیزورهای معدنی فیومد سیلیکا و مونت موریلونیت اقدام به سنتز قندهای پیش حیاتی کردند. بنابراین، برای مطالعات بعدی پیشنهاد می شود که دقیقاً مشابه کار آنها، از طریق همین واکنش این بار در حضور کاتالیزورهای معدنی سیلیس آمورف، اکسید آهن، اکسید کلسیم و غیره اقدام به سنتز قندهای پیش حیاتی شود. بطور کلی، انجام واکنش «فورموس» در حضور کاتالیزورهای معدنی در راستای تولید قندهای پیش حیاتی، پیشنهاد پژوهشی این مقاله می باشد. البته قابل ذکر است که این پیشنهاد پژوهشی در کوتاه مدت هدف کاربردی ندارد. امید است این نوشتار زمینه ساز انجام پژوهش های بیشتر در مورد واکنش «فورموس» و شیمی پیش حیاتی در داخل کشور باشد.

### منابع

قرآن کریم

- آبرومند، علی. (۱۳۸۰). *بیوشیمی ساختمان*، ج ۱. قم: قیام.
- آذرنوش، آذرتاش. (۱۳۷۹). *فرهنگ معاصر عربی- فارسی*. تهران: نی.
- اختیاری، حامد و فرجی، محمد. (۱۳۹۶). *کتابنامه ی زیست شناسی پیش دانشگاهی*. تهران: مهر و ماه.
- آوانسری، اکرم. (۱۳۹۵). *بررسی تطبیقی مسئله حیات در فلسفه و زیست شناسی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده الهیات و معارف اسلامی، گروه فلسفه، دانشگاه تبریز*.
- پراس، ادی. (۱۳۹۶). *حیات چیست؟ شیمی چگونه می شود زیست شناسی*. ترجمه رامین رامبد. تهران: مازیار.
- حق شناس، علی محمد؛ انتخابی، نرگس و سامعی، حسین. (۱۳۸۸). *فرهنگ معاصر هزاره انگلیسی- فارسی*. تهران: فرهنگ معاصر.

- حاجیان فروشانی، حمید. (۱۳۸۴). تولید و بررسی مدلی از منشا حیات، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، گروه بیوفیزیک، دانشگاه تربیت مدرس.
- حاجی حیدری، ابوالحسن. (۱۳۹۳). پیدایش جهان هستی و حیات بر کره‌ی زمین. تهران: مازیار.
- رحیمی، محمد. (۱۳۹۸). حیات در کیهان. تهران: سبزان.
- سهیلی لیراوی، معصومه. (۱۳۹۹). شیمی مواد غذایی: کربوهیدرات‌ها. تهران: معیاد اندیشه.
- شعبانی، احمد. (۱۳۹۸). نگاه شیمیایی به پیدایش مواد. نشریه نشاء علم، دوره ۱۰، شماره ۱، ۱۱-۱۶.
- قریب، امیر و فائزی زاده، زهره. (۱۳۸۸). بیوشیمی عمومی ج ۱. بروجرد: دانشگاه آزاد واحد بروجرد.
- کرام‌الدینی، محمد و همکاران. (۱۳۹۶). زیست‌شناسی دوره پیش دانشگاهی. تهران: چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران.
- کریمی، محمود و موسوی، سید مهران. (۱۳۹۶). آغاز پیدایش جهان در تفسیر آیات و آخرین یافته‌های کیهان‌شناسی. فصلنامه مطالعات تفسیری، سال ۸، شماره ۳۰، ۴۳-۶۰.
- گائینی، عباس علی و نوری، رضا. (۱۳۹۹). بیوشیمی ورزشی. تهران: تضامنی / حتمی و شرکا.
- میینی خالدی، اکبر. (۱۳۷۰). سنتز پلی‌ال‌ها از فرمالدئید، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، گروه شیمی، دانشگاه مازندران.
- میرزایی، منصور و همکاران. (۱۳۸۴). بیوشیمی هاپر، لنینجر و دولین. تهران: میر.
- مسترحمی، سید عیسی. (۱۳۹۴). عناصر مادی آفرینش جهان از منظر قرآن و کیهان‌شناسی. فصلنامه مطالعات تفسیری، دوره ۶، شماره ۲۴، ۱۴۱-۱۵۶.
- والده، پیتز. (۱۳۹۹). شیمی پیش حیاتی از مواد دوگانه دوست ساده تا مدل‌های پیش سلول. ترجمه آرش وجود و محمد خدادادی مقدم. اردبیل: انتشارات یاوریان.
- وجود، آرش. (۱۴۰۰). بررسی قابلیت افزایش گزینش‌پذیری واکنش فورموس برای تولید کربوهیدرات‌ها با روش‌های تجربی و محاسبات دینامیک مولکولی، پایان‌نامه دکتری تخصصی، دانشکده علوم، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل.
- وجود، آرش و همکاران. (۱۳۹۹). شیمی پیش حیاتی از بررسی واکنش فورموس برای تولید قندها تا انواع کاتالیزورهای مورد استفاده. اردبیل: انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اردبیل.
- هاویل، فتح‌الله و کمندانی، مهرداد. (۱۳۹۹). بیوشیمی ویژه دانشجویان رشته تربیت بدنی. تهران: شرکت تضامنی انتشاراتی حتمی و شرکا.
- یزدیان، محمد رضا. (۱۳۹۳). زیست‌شناسی جانوری. قم: انتشارات امید.

- Ameta, S. Matsubara Y.J. Chakraborty, N. Krishna, S. Thutupalli, S.(2021). Self-Reproduction and Darwinian Evolution in Autocatalytic Chemical Reaction Systems. *Life*, 11, 308.
- Botta, L. Saladino, R. Bizzarri, B.M. Cobucci-Ponzano, B. Iacono, R. Avino, R. Caliro, S. Carandente, A. Lorenzini, F. Tortora, A. Mauro, D. Moracci, M. (2018), Formamide-Based Prebiotic Chemistry in the Phlegrean Fields. *Adv. Space Res*, 62, 2372-2379.
- Biscans, A. (2018). Exploring the Emergence of RNA Nucleosides and Nucleotides on the Early Earth. *Life*, 8, 57.
- Breslow, R. (1959). On the Mechanism of the Formose Reaction. *Tetrahedron Letters*, 1, 22-26.
- Castells, J. Lopez-Calahorra, F. Geijo, F. (1980). The Formoin Reaction: A Promising Entry to Carbohydrates from Formaldehyde. *Tetrahedron Letters*, 21, 4517-4520.
- Cooper, G. Yim, S. Lanoiselée, J. Sorden, S. Ramirez, F.G. (2019). The Baseline Resolution of Aldo-Monosaccharide Enantiomers: Simplified GC–MS Analyses Using Acetal-Trifluoroacetyl Derivatives for Complex Samples. *J. Chromatogr. B: Biomed. Sci. Appl*, 1126-1127, 121761.
- Castells, J. Lopez-Calahorra, F. Geijo, F. (1983). The Formoin Reaction. *Carbohydr. Res*, 116, 197-207.
- Delidovich, I.V. Simonov, A.N. Taran, O.P. Parmon, V.N. (2014). Catalytic Formation of Monosaccharides: From the Formose Reaction towards Selective Synthesis. *ChemSusChem*, 7, 1833-1846.
- Eschenmoser, A. (2007). The Search for the Chemistry of Life's Origin. *Tetrahedron*, 63, 12821–12844 .
- Eckhardt, A.K. Bergantini, A. Singh, S.K. Schreiner, P.R. Kaiser, R I. (2019). Formation of Glyoxylic Acid in Interstellar Ices: A Key Entry Point for Prebiotic Chemistry. *Angew. Chem., Int. Ed*, 58, 5663-5667.
- Fiore, M. (2019). The Origin and Early Evolution of Life: Prebiotic Chemistry. *Life*, 9, 73.
- Greathouse, J.A. Cygan, R.T. (2005). Molecular Dynamics Simulation of Uranyl (VI) Adsorption Equilibria onto an External Montmorillonite Surface. *Phys. Chem. Chem. Phys*, 7, 3580-3586.
- Gahlaut, A. Paranjothy, M. (2021). Chemical Dynamics Simulations of Collision Induced Dissociation of Deprotonated Glycolaldehyde. *Int. J. Mass Spectrom*, 459, 116468.

- Harsch, G. Bauer, H. Voelter, W. (1984). Kinetik Katalyse und Mechanismus der Sekundarreaktion in der Schlufphase der Formose-Reaktion. *Liebigs Ann. Chem*, 29, 623-635.
- Imai, T. Michitaka, T. Hashidzume, A. (2016). Formose Reaction Controlled by Boronic Acid Compounds. *Beilstein J. Org. Chem*, 12, 2668–2672.
- Iqbal, Z. Novalin, S. (2011). Investigations on the Formose Reaction with Partial Formaldehyde Conversion: A Chance for the Production of Synthetic Carbohydrates. *Emir. J. Food Agric*, 23, 338-354.
- Jalbout, F.A. Abrell, L. Adamowicz, L. Polt, R. (2007). Apponi A.J., Ziurys L.M., Sugar Synthesis from a Gas-Phase Formose Reaction. *Astrobiology*, 7, 433-442.
- Kopetzki, D., Antonietti, M., (2001). Hydrothermal Formose Reaction, *New J. Chem*. 35, 1787–1794.
- Kofoed, J. Reymond, J.L. Darbr, T. (2005). Prebiotic Carbohydrate Synthesis: Zinc–Proline Catalyzes Direct Aqueous Aldol Reactions of A-hydroxy Aldehydes and Ketones. *Org. Biomol. Chem*, 3, 1850–1855.
- Kim, K.J. Benner, S.A. (2010). Comment on The Silicate-Mediated Formose Reaction: Bottom-Up Synthesis of Sugar Silicates. *Science*, 329, 902.
- Luisi, p.L. Walde, P. Oberholzer, T. (1999). Lipid Vesicles as Possible Intermediates in the Origin of Life. *Curr. Opin. Colloid Interface Science*, 4, 33-39.
- Lopez, A. Fiore, M. (2019). Investigating Prebiotic Protocells for a Comprehensive Understanding of the Origins of Life: A *Prebiotic Systems Chemistry Perspective*. Life, 9, 49.
- Lamour, S. Pallmann, S. Haas, M. Trapp, O. (2019). Prebiotic Sugar Formation Under Nonaqueous Conditions and Mechanochemical Acceleration. *Life*, 9, 52.
- Lambert, J.B. Guruswamy-Thangavelu, S.A. (2014). In: Zelisko P.M. (ed), *Bio-Inspired Silicon-Based Materials*, 1st edn, Springer, Heidelberg, pp.19-20.
- Li, Z. Li, L. McKenna, K.R. Schmidt, M. Pollet, P. Gelbaum, L. Fernández, F.M. Krishnamurthy, R. Liotta, C.L. (2019). The Oligomerization of Glucose Under Plausible Prebiotic Conditions. *Origins Life Evol. Biospheres*, 29, 225-240.
- Lambert, J.B. Guruswamy-Thangavelu, S.A. Ma, K. (2010). The Silicat-Mediated Formose Reaction: Bottom-Up Synthesis of Sugar Silicat. *Science*, 327, 984-986.
- Liu, X. Zhu, R. Ma, J. Ge, F. Xu, Y. Liu, Y. (2013). Molecular Dynamics Simulation Study of Benzene Adsorption to Montmorillonite: Influence of the Hydration Status. *Colloids Surf., A*, 434, 200-206.

- 
- Mayer, C. (2020). Life in The Context of Order and Complexity. *Life*, 10, 5.
- Mizuro, T. Weiss, A.H. (1974). Synthesis and Utilization of Formose Sugars. *Adv. Carbohydr. Chem. Biochem*, 29, 173-227.
- Omran, A. (2020). Orig Life Evol. *Biosph*. <https://doi.org/10.1007/s11084-020-09599-5>
- Omran, A. Menor-Salvan, C. Springsteen, G. Pasek, M. (2020). The Messy Alkaline Formose Reaction and Its Link to Metabolism. *Life*, 10, 125.
- Paecht-Horowitz, M. (1973). The Origin of Life. *Angew. Chem., Int. Ed*, 12, 349–356.
- Phuong Tran, Q. Adam, Z.R. Fahrenbach, A.C. (2020). Prebiotic Reaction Networks in Water. *Life*, 10, 352.
- Pallmann, S. Šteflová, J. Haas M. Lamour, S. Henß, A. Trapp, O. (2018). *Carbohydrate Schreibersite: An Effective Catalyst in the Formose Reaction Network*. *New J. Phys*, 20, 055003-055004.
- Pérez-Villaa, A. Pietruccia, F. Saittam, A.M. (2020). Prebiotic Cchemistry and Origins of Life Research with Atomistic Computer Simulations. *Phys. Life Rev*, 34-35, 105-135.
- Stovbun, S.V. Zanin, A.M. Shashkov, M.V. Skoblin, A.A. Zlenko, D.V. Tverdislov, V.A. Mikhaleva, M.G. Taran, O.P. Parmon, V.N. (2019). Spontaneous Resolution and Super-coiling in Xerogels of the Products of Photo-Induced Formose Feaction. *Orig Life Evol. Biosph*, 49, 187-196.
- Shapira, J. (1967). *Design and Evaluation of Chemically Synthesized Food for Long Space Missions*, In: *The Closed Life-Support System*, NASA-Ames Research Center, Washington, D.C .
- Shigemasa, Y. Taji, T. Sakazawa, C. Nakashima, R. Matsuura, T. (1979). Formose Reactions: VIII. Solvent Effects in the Formose Reaction. *J. Catal*, 58, 296-302.
- Simonov, A.N. Pestunova, O.P. Matvienko, L.C. Snytnikov, V.N. Snytnikova, O.A. Tsentalovich, Y.B. Parmon, V.N. (2007). Possible Prebiotic Synthesis of Monosaccharides from Formaldehyde in Presence of Phosphates. *Adv. Space Res*, 40, 1634-1640.
- Thripati, S. Ramabhadran, R.O. (2017). Metal-Ion- and Hydrogen-Bond-Mediated Interstellar Prebiotic Chemistry: The First Step in the Formose Reactio. *J. Phys. Chem. A*, 121, 8659–8674.
- Weiss, A. H. Socha, R.F. Likhologo, V.A. Sakharov, M.M. (1981). Formoin Sugars From Formaldehyde. *Appl. Catal*, 1, 237-246.
- Weber, A.L. (1991). Origin of Fatty Acid Synthesis: Thermodynamics and Kinetics of Reaction Pathways. *J. Mol. Evol*, 32, 93–100.

- Weber, A.L. (1987). The Triose Model: Glyceraldehyde as a Source of Energy and Monomers for Prebiotic Condensation Reactions. *Origins Life*, 17, 107–119.
- Weber, A.L. (1992). Prebiotic Sugar Synthesis: Hexose and Hydroxy Acid Synthesis from Glyceraldehyde Catalyzed by Iron (III) Hydroxide Oxide. *J. Mol. Evol*, 35,1-6.
- Yamashita, K. Wakao, N. Nango, M. Tsuda, K. (1992). Formose Reaction by Polymer-Supported Thiazolium Salts. *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem*, 30, 173-227.
- Zweckmair, T. Böhmendorfer, S. Bogolitsyna, A. Rosenau, T. Potthast, A. Novalin, N. (2014). Accurate Analysis of Formose Reaction Products by LC–UV: An Analytical Challenge, *J. Chromatogr. Science*, 52, 169-175.
- Ziemecki, s.b. LaPierre, R.B. Weiss, A.H. Sakharov M.M. (1977). Homogeneously Catalyzed Condensation of Formaldehyde to Carbohydrates: VI. Preparation and Spectroscopic Investigation of Complexes Active in Formaldehyde Condensation. *J Catal*, 50, 455-463.