



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2045038.1975



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## Studying and Ranking Production Methods of 2,5-Furan dicarboxylic acid by Implementing the Analytical Hierarchy Process (AHP)

Hassan Rajabi Aghbash<sup>1</sup>, Asadollah Karimi<sup>2</sup>, Elham Khalaj Karimi<sup>3</sup>, Siamak Alipour<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Persian Gulf Star Oil Refinery, Bandar Abbas, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>3</sup> M. Sc student of Chemical Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: 27 Aug 2024 Accepted: 20 Nov 2024

### Abstract

In recent years, chemical industries have sought to identify renewable resources derived from biomass in order to reduce dependence on fossil resources, decreasing the resulting pollution and carbon dioxide emissions. 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) is one of the building blocks that connects biomass conversion to value added chemicals. Oxidation of 5-hydroxymethylfurfural produces the FDCA, from which a valuable monomer namely polyethylene furanoate can be synthesized, which is an alternative to polyethylene terephthalate. In this study, the main goal is to choose the best procedure for producing FDCA by implementing the Analytical Hierarchical Process (AHP). The AHP was performed by selecting economic, environmental, technical, social and reliability justification as criteria, and oxidation, catalytic and biological methods were considered as alternatives for these comparisons. In these studies, comparisons were made between the criteria, sub-criteria and alternatives. Thus, the biological method was prioritized with 52% and the economic criterion with 47.1%.

**Keyword:** 2,5-Furan Dicarboxylic Acid (FDCA), Analytical Hierarchical Process (AHP), 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF)

\* s.alipour@maragheh.ac.ir

### Please Cite This Article Using:

Rajabi Aghbash, H., Karimi, A., Khalaj Karimi, E., Alipour, S., "Studying and Ranking Production Methods of 2,5-Furan dicarboxylic acid by Implementing the Analytical Hierarchy Process (AHP)", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 87, pp. 43-54, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2045038.1975



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## مطالعه و رتبه‌بندی روش‌های تولید ۵،۲- فوراندی کربوکسیلیک اسید با بکارگیری فرایند تحلیل سلسله مراتبی

حسن رجبی آق‌باش<sup>۱</sup>، اسداله کریمی<sup>۲</sup>، الهام خلیج کریمی<sup>۳</sup>، سیامک علیپور<sup>\*۲</sup>

<sup>۱</sup> پالایشگاه نفت ستاره خلیج فارس، بندرعباس، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

دریافت: 1403/06/06 پذیرش: 1403/08/30

### چکیده

صنایع شیمیایی در سال‌های اخیر به‌دنبال شناسایی منابع تجدیدپذیر مشتق شده از زیست توده می‌باشند تا وابستگی به منابع فسیلی، آلودگی ناشی از آن و انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش دهند. ۵،۲-فوراندی کربوکسیلیک اسید یکی از بلوک‌های سازنده مرتبط کننده زیست توده به مواد شیمیایی باارزش افزوده است. اکسیداسیون ۵-هیدروکسی متیل فورفورال سبب تولید ۵،۲-فوراندی کربوکسیلیک اسید می‌شود که از آن مونومر با ارزش به نام پلی‌اتیلن‌فورانات تشکیل می‌گردد که به‌عنوان جایگزینی برای پلی‌اتیلن‌ترفتالات استفاده می‌شود. در این مطالعه، هدف اصلی انتخاب بهترین رویه برای تولید FDCA با بکارگیری فرایند تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. پارامترهای توجیه اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی، اجتماعی و قابلیت اطمینان به عنوان معیار معرفی گردید و همچنین روش‌های اکسیداسیون، کاتالیزوری و بیولوژیکی گزینه‌های این مقایسات محسوب می‌شوند. در این مطالعات مقایساتی بین معیارها، زیر معیارها و گزینه‌ها صورت گرفت که روش بیولوژیکی با 52 درصد و معیار اقتصادی با 47/1 درصد در اولویت قرار گرفت.

**کلمات کلیدی:** تحلیل سلسله مراتبی، ۵،۲-فوراندی کربوکسیلیک اسید، ۵-هیدروکسی متیل فورفورال

\* s.alipour@maragheh.ac.ir

## 1- مقدمه

امروزه تغییرات چشمگیر در محیط زیست به دلیل استفاده بیش از حد از منابع فسیلی، نوسان‌های قیمتی سوخت‌های فسیلی به دلایل گوناگون و وابستگی به منابع فسیلی برای تولید مواد شیمیایی چالشی را برای جستجو منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست به وجود آورده است. زیست توده منبع تجدیدپذیر مناسبی برای توسعه انرژی‌های پایدار و مواد با ارزش افزوده است. سالانه مقادیر قابل توجهی زیست توده در دنیا تولید می‌شوند که قابلیت تأمین مواد اولیه برای تولید محصولات مورد نیاز جامعه را دارا می‌باشند. از این رو نقشه راه جامعی به توصیه وزارت انرژی ایالات متحده برای این منظور پیشنهاد شده [1]، که توسط محققان مستقل بررسی گردیده [2, 3] و به روز رسانی نیز شده است [4]. بر پایه آمار و ارقام فعلی، ارزش بازار FDCA<sup>1</sup> در سال 2025 تقریباً 770 میلیون یورو پیش بینی می‌شود [5]. در این رویه کربوهیدرات‌ها از زیست توده استخراج شده، سپس با اعمال روش‌های مختلف و متعدد بیولوژیکی و شیمیایی به بلوک‌های سازنده تبدیل گردیده و در نهایت محصولات مطلوب از آن‌ها سنتز می‌شوند. ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید<sup>2</sup> یکی از بلوک‌های سازنده است که در زنجیره تأمین مواد شیمیایی بر پایه زیست توده قرار گرفته است. این ماده دارای پتانسیل بالایی بوده و برای تولید محصولات نهایی با ارزشی مانند پلی‌استرها، پلی‌آمیدها، هم‌سپارها و حلال‌ها استفاده می‌شود در نتیجه کاربردهای گسترده‌ای برای تولید انواع پلیمر و تأمین سوخت دارد [6]. [7]. هگزوزها، کربوهیدرات‌های شش کربنه و فراوان‌ترین مونوساکارید موجود در طبیعت هستند که جزو اصلی‌ترین ماده‌ها برای تولید فورانیک‌ها می‌باشد. تبدیل کاتالیزوری هگزوزها به فورانیک‌ها شامل چند مرحله از جمله آگیری، هیدرولیز، ایزومریزاسیون، رفرمینگ، تراکم آلدول، هیدروژناسیون و اکسیداسیون و غیره است که مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید، ۵-هیدروکسی متیل فورفورال<sup>3</sup>، ۲،۵- دی فرمیل فوران<sup>4</sup> [8] سیکلوپنتانون<sup>5</sup>، گاما-والرولاکتون<sup>6</sup> و اسید لولینیک<sup>7</sup> جزو نمایندگان فورانیک‌ها به‌شمار می‌آیند که از گلوکز و فروکتوز قابل تهیه می‌باشند. این مواد شیمیایی نقش مهمی در صنایع مختلف دارند، به عنوان مثال، سیکلوپنتانون به عنوان پیش ماده برای عطرها، ساخت حشره کش‌ها و آفت کش‌ها استفاده می‌شود. اسید لولینیک به طور گسترده‌ای به عنوان یک پیش ماده برای داروها، نرم کننده‌ها و سنتز افزودنی‌های سوخت استفاده می‌شود. گاما-والرولاکتون به دلیل طعم گیاهی می‌تواند در صنایع عطرسازی و طعم‌دهنده استفاده شود و همچنین به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر و یک حلال سبز محسوب می‌شود. از دیگر سو دلیل عمده اهمیت تولید ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید قابلیت جایگزینی پلی اتیلن ترفتالات (PET) است که سالانه در مقیاس میلیون تن مصرف می‌گردد [9] علاوه بر اینکه بستری برای پلاستیک‌های زیستی است، به عنوان یک ماده اولیه برای تولید قارچ کش‌ها و تولید مواد دارویی فعال با خواص

<sup>1</sup> Furan dicarboxylic acid

<sup>2</sup> 2,5-Furandicarboxylic Acid

<sup>3</sup> 5-Hydroxymethylfurfural

<sup>4</sup> 2,5-Diformylfuran

<sup>5</sup> Cyclopentanone

<sup>6</sup> Gamma-Valerolactone

<sup>7</sup> Levulinic Acid

بی‌حس‌کننده شناخته می‌شود و به عنوان یک بازدارنده خوردگی در میان سایر کاربردها استفاده شده است [10]. 5- هیدروکسی متیل فورفورال (HMF) می‌تواند از طریق تراکم، هیدرولیز، هیدروژناسیون، اکسیداسیون به چندین مولکول با ارزش تبدیل شود. ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید یکی از این مولکول‌ها است در حال حاضر، مسیرهای اصلی برای تهیه ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید شامل اکسیداسیون 5- هیدروکسی متیل فورفورال، کربوکسیلاسیون اسید فوروئیک، فورانولاسیون و آبگیری اکسایشی هگزوزها است. اکسیداسیون کاتالیزوری 5- هیدروکسی متیل فورفورال در دو مرحله تولید می‌شود: اکسیداسیون گروه الکلی 5- هیدروکسی متیل فورفورال به آلدئید، و پس از آن اکسیداسیون دو گروه آلدئید به اسید کربوکسیلیک [11] در روش کربوکسیلاسیون فوروئیک اسید از فوروئیک اسید به‌عنوان ماده خام برای تولید 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید تحت اثر دی‌اکسیدکربن استفاده می‌شود. روش فورانویلاسیون، فوران و انیدرید استیک 2،5- دی‌استیل فوران<sup>8</sup> را در شرایط ملایم تولید می‌کنند و سپس تحت واکنش یدوفرم برای تهیه 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید قرار می‌گیرند. در مسیر آب‌گیری و چرخه شدن اسید هگزان دیوئیک ابتدا از هگزوز به‌عنوان ماده خام برای اکسید شدن به اسید هگزان دیوئیک استفاده می‌شود و سپس آب‌گیری و چرخه‌سازی برای تولید 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید انجام می‌شود [12]. تولید اقتصادی FDCA تا به الان، به دلیل مواد اولیه گران قیمت به جایگاه اصلی خود نرسیده است. زیرا ماده اولیه HMF می‌تواند به راحتی در حین واکنش‌ها به محصولات جانبی مانند هومین<sup>9</sup> ها تجزیه شود [13]. واکنش اکسیداسیون 5- هیدروکسی متیل فورفورال به دلیل تأمین ماده اولیه از منبع تجدیدپذیر، مسیر واکنش ساده و گزینش‌پذیری بالا به‌عنوان یک روش پرکاربرد شناخته می‌شود [14]. از انواع سیستم‌های واکنش اکسیداسیون 5- هیدروکسی متیل فورفورال می‌توان به اکسیداسیون شیمیایی، ترموکاتالیز، فوتوکاتالیز، الکتروکاتالیز، و اکسیداسیون بیوکاتالیستی اشاره کرد که از این بین اکسیداسیون کاتالیزوری حرارتی به دلیل غلظت واکنش‌دهنده بالا و راندمان بالا مورد توجه قرار گرفته است [12]. اخیراً، تلاش‌های زیادی برای توسعه کاتالیزورهای جدید برای اکسیداسیون این ماده از طریق رویکرد حرارتی کاتالیزوری، الکتروکاتالیستی یا فوتوکاتالیستی انجام شده است. از دیگر دلایل اهمیت کاتالیزگر حرارتی که آن را مورد توجه قرار داده است، عملکرد راحت و فراوانی آن است. به‌ویژه، کاتالیزورهای ناهمگن ویژگی‌های زیادی نسبت به کاتالیزور همگن در مورد جداسازی و قابلیت استفاده مجدد دارد [15]. علاوه بر این، اسیدیته سطحی و قلیابیت کاتالیزور به طور موثر با عملیات اسید-باز تنظیم می‌شود، بنابراین تاثیر خاصی در انتخاب پذیری و کارایی کاتالیزوری کاتالیزور دارد. این رویکرد به ویژه برای واکنش‌های شیمیایی که نیاز به فعالیت کاتالیزوری و گزینش‌پذیری خاص دارند، مناسب است [16]. پیشرفت در شیمی سبز باعث انجام اکسیداسیون توسط کاتالیزور ناهمگن با استفاده از اکسیژن مولکولی به‌عنوان یک اکسیدکننده می‌گردد و فرآیند شیمیایی مطلوب‌تری را برای محیط‌زیست فراهم کند. سنتز کاتالیزوری ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید از 5- هیدروکسی متیل فورفورال عمدتاً شامل واکنش‌های اکسیداسیون با استفاده از کاتالیزورهای فلزی مختلف و عوامل اکسیدکننده است. کاتالیزورهای همکاران

<sup>8</sup> 5-2-Diacetylfuran

<sup>9</sup> Homin

به این نتیجه رسیده‌اند که یک کاتالیزور فلزی با پشتیبانی از هیدرو تالسیت، فعالیت قابل توجهی را برای اکسیداسیون الکل انتخابی با اکسیژن مولکولی یا هیدروژن زدایی الکل بدون اکسیدان در شرایط متوسط نشان می‌دهد. [17]. با این وجود، توسعه کاتالیزورهایی که قادر به انجام به اکسیداسیون HMF در فشار کم و بدون نیاز به پایه برای کاتالیزور هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. به عنوان مثال، اکسید منگنز به خوبی در واکنش اکسیداسیون HMF استفاده شده است که دلیل آن، ویژگی‌های قلیایی ذاتی و فعالیت اکسیداسیون این ماده می‌باشد [18].

همچنین جایگزینی مواد شیمیایی تولید شده از نفت با جایگزین‌های تجدیدپذیر یک استراتژی فعلی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بخش شیمیایی است. پلی اتیلن فورانات<sup>10</sup> نوعی پلیمر زیستی است که قابلیت بازیافت کامل دارد و از مواد خام تجدید پذیر یا کربوهیدرات‌هایی ساخته می‌شود که از زیست‌توده به دست می‌آیند. این ماده از گروه فورانیک‌ها می‌باشد و به عنوان نسل بعدی پلی‌استرها شناخته می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که بازار پلی‌اتیلن فورانات (PEF) به تنهایی پس از تجاری‌سازی آن 50 درصد افزایش یابد و به تقاضای 81/9 کیلو تن برسد. با این حال، تولید این ماده به مسیرهای کارآمد سنتر 5- هیدروکسی متیل فورفورال و 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید وابسته است [19]. PEF دارای ساختار مکانیکی بهتر، پایداری حرارتی بالاتر و نسبت به PET مانع گاز بالا مبتنی بر نفت است [20]. با توجه به اهمیت 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید پیشنهاد فرایند سنتر آن به صورتی که تمامی عوامل موثر و پارامترهای مهم مانند توجیه اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی، و تأثیر مبرم آن بر جامعه، ضروری به نظر می‌آید. از این رو نیازمند به کارگیری روش کارآمدی جهت تصمیم‌گیری بین عوامل مختلف می‌باشد. همچنان که ذکر شد فرایندهای گوناگونی پیشنهاد شده‌اند که انتخاب بهینه را به دلیل در نظر گرفتن عوامل متعدد که گاه با هم در تضاد یا رقابت هستند را دشوار می‌کند. بدین جهت روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>11</sup> (AHP) که روشی توانمند و منعطف در دسته روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که به وسیله آن می‌توان مسائل پیچیده را در سطوح مختلف حل کرد انتخاب شود. توانمندی روش AHP در تصمیم‌گیری به منظور انتخاب فرایند یا مواد مورد نیاز در ساخت تجهیزات در مقالات متفاوتی گزارش شده است. به عنوان مثال به بررسی فرایندهای جداسازی و فرآوری اسید فرمیک از محلول رقیق آبی و انتخاب گزینه مطلوب، همچنین بررسی مواد گوناگون و انتخاب جنس مناسب برای کاتد، آند و الکترولیت در پیل سوختی می‌توان اشاره کرد [21, 22].

هدف اصلی این روش انتخاب بهترین گزینه براساس معیارها، زیر معیارها و گزینه‌ها گوناگون از طریق مقایسه زوجی<sup>12</sup> است. طبق مطالعات صورت گرفته بر روی 2،5- فوراندی کربوکسیلیک اسید، سه گزینه<sup>13</sup> اکسیداسیون، کاتالیزوری و بیولوژیکی جهت معرفی فرایند تولید مطلوب در این روش تحلیل سلسله مراتبی انتخاب شدند. همچنین به علت

<sup>10</sup> Polyethylene Furanoate

<sup>11</sup> Analytic Hierarchy Process

<sup>12</sup> Pairwise

<sup>13</sup> Alternative

ارزیابی بهتر و منطقی، پنج معیار<sup>14</sup> محیط‌زیستی، اقتصادی، تکنیکی، اجتماعی و قابلیت اطمینان برای سنجش گزینه مناسب در فرایند AHP و استفاده آن در نرم‌افزار اکسپرت چویس<sup>15</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## 2- روش کار

کاملاً گویا است که برای تولید هر ماده، چندین روش یا گزینه وجود دارد اما اینکه تمام روش‌ها کاربردی و به‌صرفه باشند دور از انتظار است و نیازمند فناوری‌های نوین می‌باشند. در گذشته، جهت انتخاب روش تولید از جنبه‌های اقتصادی و گاهاً محیط‌زیستی بررسی می‌شدند ولی امروزه با پیشرفت فناوری‌ها و نگاه جوامع بین‌المللی در جهت کاهش انواع آلودگی‌ها قوانین سختگیرانه‌ای وضع گردیده است که علاوه بر جنبه‌های قبلی، بایستی سایر معیارها و پارامترها نیز در این زمینه مدنظر قرار گرفته و به‌کار گرفته شوند. بدین جهت برای مقایسه میان این روش‌ها از فرایند AHP استفاده شده است. رویه AHP یک روش ساختاری بر اساس قواعد منطقی جهت سازماندهی و آنالیز تصمیمات پیچیده بر پایه علم ریاضیات و روانشناسی است [23]. این فرایند توسط توماس ال ساعتی<sup>16</sup> تهیه گردیده است به‌عنوان روش تصمیم‌گیری چند معیاره نیز شناخته می‌شود که به‌منظور دستیابی به راه‌حل‌های مناسب استفاده شده است. این تکنیک بر اساس مقایسه‌های زوجی تعریف شده و توانایی بررسی سناریوهای مختلف را به دست می‌دهد. با این تکنیک به‌دلیل فرموله کردن می‌توان مسئله را به‌صورت سلسله مراتبی ادا کرد که بر اساس اصول بدیهی<sup>17</sup> بنا شده است [24]. روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) است روش‌های زیادی برای حل مشکلات چندمعیاره تهیه شده است و چارچوب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از روش‌های ساده گرفته تا روش‌های پیچیده، متفاوت است [22]. ژو<sup>18</sup> و همکاران راه و روش‌های مختلف MCDM را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که AHP اولویت داده شده‌ترین رویکرد در بین رویه‌های موجود برای ارزیابی انرژی است [21]. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در حالتی که روش‌ها تحت چند شاخص متغیر با یکدیگر به رقابت می‌پردازند اهمیت فراوانی دارد و این شاخص‌ها می‌توانند به‌صورت کمی یا کیفی مطرح شوند [25]. تحلیل سلسله مراتبی از طریق یک روش ساختار یافته که مسئله را به سلسله مراتبی از معیارها و زیر معیارها تبدیل می‌کند حل می‌شود. این امر به ساده‌سازی مسئله و تصمیم‌گیری کمک می‌کند و درصد خطا را کاهش می‌دهد. تصمیم‌گیرندگان بر اساس مقایسه زوجی اهمیت موارد مورد مطالعه را ارزیابی می‌کنند. ارزیابی‌های زوجی ما را در انتخاب این که کدام معیار نسبت به سایر معیارها بسیار ضروری‌تر است کمک می‌کند و اگر معیاری ارجحیت داده شود، در چه مقیاسی از قضاوت کیفی اهمیت دارد. سپس مقایسات زوجی با اتکا بر جبر معین و اولویت‌ها برای هر معیار سنجیده می‌شوند و معیارهای برتر به‌عنوان بهترین اولویت‌ها رتبه‌بندی می‌شوند [26]. باید خاطر نشان کرد که اگر نرخ سازگاری کمتر از 0/1 باشد می‌توان سازگاری مقایسات را پذیرفت در غیر این‌صورت باید مقایسات تکرار گردد از مزیت‌های AHP می‌توان به انعطاف‌پذیری، اولویت‌بندی و بررسی سازگاری اشاره کرد. این روش زمانی مطلوب است که وجود معیارهای مختلف تصمیم‌گیری را دشوار کنند اما توجه به این نکته که

<sup>14</sup> Criteria

<sup>15</sup> Expert Choice

<sup>16</sup> Thomas L. Saaty

<sup>17</sup> Axioms

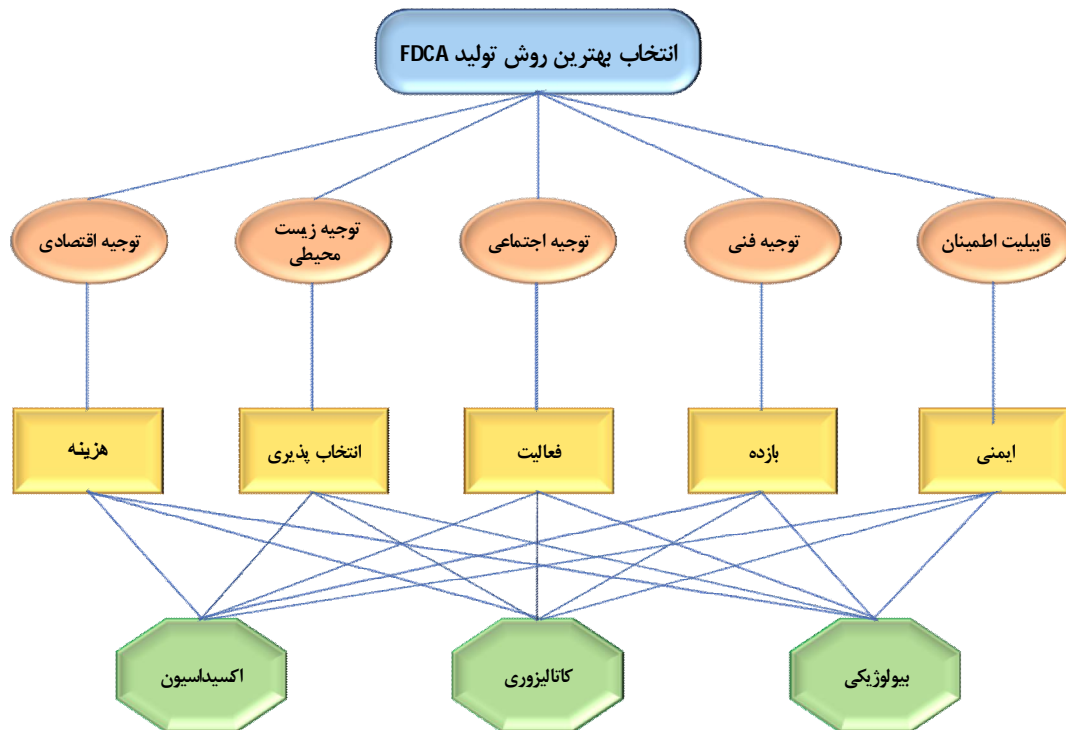
<sup>18</sup> Zhou

فرایند AHP همیشه بهترین گزینه برای تصمیم‌گیری نیست نیز ضروری است [27, 28]. فرایند تحلیل سلسله مراتبی در چند مرحله (گام) انجام می‌شود که مراحل آن در نمودار درختی قابل مشاهده می‌باشد. اولین گام در فرایند AHP تعریف هدف است. گام‌های بعدی شامل تعریف معیارها و زیر معیارها، ارزیابی معیارها و محاسبه ضرایب وزنی، توسعه سلسله مراتب، ارزیابی جداگانه معیارها بر اساس هر معیار، ارزیابی گزینه‌ها بر اساس همه معیارها و تصمیم‌گیری می‌باشد [29]. نرم‌افزار اکسپرت چویس برنامه‌ای برای محاسبات مقایسه زوجی مبتنی بر AHP است. استفاده از این نرم‌افزار به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری، اعمال هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی و تحلیل سازگاری مطلوب است [30].

جدول 1- نحوه مقایسات زوجی معیارها به صورت عددی [23]

مقدار عددی	وضعیت مقایسه i نسبت به j	توضیحات
1	اهمیت برابر	شاخص i نسبت به j ارجحیتی ندارد
3	نسبتاً مهم‌تر	شاخص i نسبت به j کمی مهم‌تر است
5	مهم‌تر	شاخص i نسبت به j مهم‌تر است
7	خیلی مهم‌تر	شاخص i دارای ارجحیت خیلی بیشتر از j است
9	کاملاً مهم	شاخص i مهم‌تر و قابل مقایسه با j نیست
۲،۴،۶،۸		اهمیت و ارجحیت بین مقادیر فوق

نمودار درختی انتخاب بهترین روش تامین ۲،۵-فوراندی کربوکسیلیک اسید در شکل شماره 1 نشان داده شده است. همچنان که ذکر شد هدف در این مطالعه انتخاب بهترین و مناسب‌ترین روش برای تولید ۲،۵-فوراندی کربوکسیلیک اسید می‌باشد. معیارها در برگیرنده قابلیت اطمینان و توجیه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و اجتماعی می‌باشد همچنین زیر معیارها شامل ایمنی بازده، فعالیت، انتخاب‌پذیری و هزینه است. به طبع با توجه به اهمیت قوانین زیست‌محیطی، بایستی یک یا چند زیر معیار جزو معیار زیست‌محیطی باشد و با توجه به پیشرفت روزافزون در صنعت و اینکه صنایع امروزی برای افزایش سود و توسعه حوزه فعالیت‌های خود در پی کاهش هزینه‌های تولیدی هستند [31] نشان از اهمیت معیار اقتصادی می‌دهد، همان‌طور که قبلاً اشاره شد ممکن است یک روش باعث تولید ماده مورد نظر شود اما از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد.



شکل 1- روندنمای فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب بهترین روش

اکسیداسیون 5- هیدروکسی متیل فورفورال در شرایط قلیایی شدید بر روی کاتالیزورهای فلزات نجیب باعث تشکیل مقدار کمی FDCA می شود و مشخص گردید که هزینه عملیاتی چندان بالایی ندارد که این امر باعث صرفه جویی در مصرف مواد شیمیایی می شود و فعالیت بالایی از ۲،۵- فوراندی کربوکسیلیک اسید را می توان در دماهای بالا به دست آورد، ولی بررسی ها نشان داد که از بازدهی بالایی برخوردار نیست [32]. با توجه به پایداری پایین واکنش ها، هزینه های تولید در صورت استفاده از این روش بسیار پایین است [19]. فعالیت کاتالیزوری نیز مورد بررسی قرار گرفت، از جمله زمان واکنش، دمای واکنش، فشار  $O_2$  و بازیابی و بازیافت راحت کاتالیزور که در شرایط مطلوب، ماده مورد نظر را می توان با فعالیت بالا تولید کرد و همچنین هزینه تولید در این روش قابل توجه و بالا می باشد [8]. گزینه بیولوژیکی که آنزیم های سازگار با محیط زیست دارد به نوبه خود مورد توجه قرار می گیرد که با توجه به بازدهی و گزینش پذیری بالایی که این روش تولید در شرایط مطلوب از خود به ثبت رسانیده است در بهبود شرایط محیطی زیستی حائز اهمیت می باشد [33].

### 3- نتایج و بحث

در این مطالعه به منظور تعیین بهترین روش برای تولید ۵،۲- فوراندی کربوکسیلیک اسید از فرایند AHP استفاده گردید. ابتدا با مطالعه مقالات روش های موجود بررسی و انتخاب شدند. این روش ها شامل اکسیداسیون، تبدیل کاتالیزوری و تبدیل بیولوژیکی می باشند. بر اساس روش های موجود معیارهای تاثیرگذار در انتخاب مناسب ترین روش شناسایی و به زیر معیارها تقسیم شدند. همانطور که در شکل 1 اشاره گردیده است سطح اول هدف، سطح دوم معیارهای مقایسه زوجی (اقتصادی، محیط زیست، اجتماعی، فنی و قابل اطمینان) است و به همین ترتیب سطح سوم زیر معیارها و سطح چهارم روش های تولیدی انتخابی را نشان می دهد. سپس با استفاده از نرم افزار اکسپرت چویس

مقایسات و محاسبه نرخ سازگاری انجام شد و مقدار ناسازگاری<sup>19</sup> کمتر از 0/1 لحاظ شد. با انجام تحلیل سلسله بنا بر توضیحات ارائه شده، مشخص گردید معیار توجیه اقتصادی با امتیاز 0/471 حائز رتبه نخست در میان معیارها می‌باشد. معیارهای تاثیرگذار بعدی به ترتیب توجیه‌های محیط‌زیستی، فنی، اجتماعی و قابل اطمینان بودن قرار دارند. همچنین بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول 2، مقدار ناسازگاری کمتر از 0/1 می‌باشد که نشان‌گر تصمیم‌گیری قابل اطمینان است.

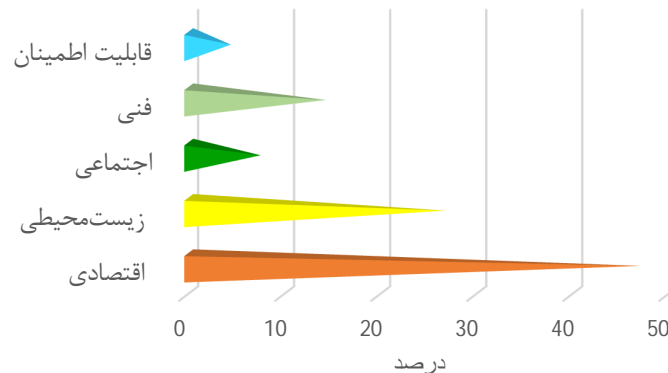
**جدول 2- نتایج نهایی AHP برای اولویت‌بندی تولید FDCA**

گزینه‌ها			زیرمعیارها	معیارها
اکسیداسیون	کاتالیزوری	بیولوژیکی		
0/027	0/222	0/222	هزینه (0/471)	توجیه اقتصادی (0/471)
0/06	0/018	0/19	گزینه پذیرگی (0/268)	توجیه زیست محیطی (0/268)
0/005	0/053	0/017	فعالیت (0/075)	توجیه اجتماعی 0/075
0/024	0/024	0/095	بازده (0/143)	توجیه فنی (0/143)
0/0311	0/0031	0/0098	ایمنی (0/044)	قابلیت اطمینان (0/044)
0/1471	0/3201	0/5338	جمع	
3	2	1	رتبه	

هزینه عملیاتی تولید 5، 2-فوراندی کربوکسیلیک اسید نشان می‌دهد که معیار اقتصادی با 47/1 درصد نسبت به سایر معیارها بالاترین ارجحیت و برتری را دارد. سپس در رتبه دوم معیار محیط‌زیستی با 26/8 درصد قرار دارد که با توجه به تجزیه و تحلیل انجام شده اختلاف ارجحیت این معیار با معیار فنی کم بوده و به کمتر از 12 درصد می‌رسد. پس از معیارهای ذکر شده، معیار اجتماعی و قابلیت اطمینان به دلیل درصدهای پایین و اقتصادی نبودن استفاده و در نظر گرفتن آن مطلوب نیست که درصد معیار قابلیت اطمینان به 4/4 درصد می‌رسد. نتیجه این مقایسه در شکل 2 نمایش داده شده است. به علاوه، مقدار ناسازگاری تعیین شده کمتر از 0/1 می‌باشد که نشان‌گر قابل اتکا بودن این آنالیز است. در صورت مقایسه با سایر مقالات منتشر شده در زمینه تحلیل اقتصادی فرایند (مراجعه شود به [34, 35]) مشخص می‌گردد این یافته در همان راستا بوده و هزینه‌های عملیاتی در تامین منبع اغلب در صدر موارد قرار می‌گیرد.

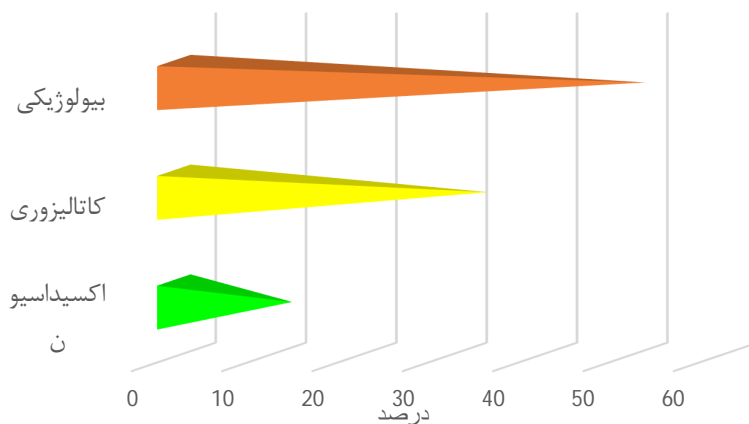
<sup>19</sup> Inconsistency Amount

شکل 2- نتایج به دست آمده از مقایسه دوتایی برای گزینه‌ها در نرم افزار



بر اساس امتیازدهی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی گزینه‌ها نیز مرتبه‌بندی شده‌اند که در میان روش‌های تولید بیولوژیکی، کاتالیزوری و اکسیداسیون، روش بیولوژیکی در مکان نخست قرار گرفته است. البته محاسبات نشان‌گر مقدار ناسازگاری در محدوده مطلوب است (جدول 2). با انجام سنجش دوتایی بین گزینه‌ها نسبت به هدف، نتایج نشان داده شده در شکل 3 نمایان‌گر اهمیت روش بیولوژیکی با 52% می‌باشد، سپس روش‌های کاتالیستی و اکسیداسیون به ترتیب با درصد‌های 35% و 13% در ارجحیت قرار دارد.

شکل 3- نتایج به دست آمده از مقایسه دوتایی برای معیارها در نرم افزار



#### 4- نتیجه‌گیری

۲،۵-فوراندی کربوکسیلیک اسید یک ترکیب شیمیایی آلی متشکل از دو گروه اسید کربوکسیلیک است که از کربوهیدرات‌های شش کربنه تولید شده و می‌تواند به‌عنوان یک سکوی مشتق شده از زیست‌توده به‌عنوان یک ماده شیمیایی پایه‌ای در نظر گرفته شود. بنابراین در این مطالعه، به‌همین منظور برای انتخاب بهترین و مناسب‌ترین فناوری‌ها فرایند AHP برای بررسی رویکردهای مختلف تولید ۲،۵-فوراندی کربوکسیلیک اسید به کار گرفته شد. برای انجام مقایسات و تحلیل توسط روش AHP، توجیه اقتصادی، توجیه محیط‌زیستی، توجیه فنی، توجیه اجتماعی و قابلیت اطمینان به‌عنوان معیارها مورد سنجش قرار گرفت. همچنین روش‌های بیولوژیکی، کاتالیستی و اکسیداسیون برای تصمیم‌گیری در خصوص بهینه‌سازی پیشنهاد شد. با استناد بر نتایج به دست آمده در فرایند AHP، توجیه

اقتصادی با 0/47 درصد به عنوان معیار اصلی و تبدیل بیولوژیکی 0/52 درصد بین گزینه‌ها، رتبه نخست را کسب کرد. علاوه بر این ناسازگاری به طور قابل توجهی کمتر از 0/1 است که بیانگر معقول بودن مقایسه زوجی معیارها می‌باشد.

## 5- منابع

- [1] Holladay, J., et al., *Top value-added chemicals from biomass*. DOE Report PNNL, pp. 16983, 2007.
- [2] Fitzpatrick, S.W., *The Biofine technology: A "bio-refinery" concept based on thermochemical conversion of cellulosic biomass*. ACS Publications, 2006.
- [3] Kamm, B., P.R. Gruber, and M. Kamm, *Biorefineries-industrial processes and products*. Vol. 2. Wiley-VCH Weinheim, 2006.
- [4] Bozell, J.J. and G.R. Petersen, *Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy's "Top 10" revisited*. Green chemistry, 12(4): pp. 539-554, 2010.
- [5] Rapado, P., et al., *Biomass to plastics: From HMF to fructose for the synthesis of 2, 5-furandicarboxylic acid over Au/TiO<sub>2</sub>*. Catalysis Today, pp. 115036, 2024.
- [6] Istasse, T. and A. Richel, *Mechanistic aspects of saccharide dehydration to furan derivatives for reaction media design*. RSC advances, 10(40): pp. 23720-23742, 2020.
- [7] Zhu, B., et al., *2, 5-Bis (hydroxymethyl) furan: a new alternative to HMF for simultaneously electrocatalytic production of FDCA and H<sub>2</sub> over CoOOH/Ni electrodes*. Applied Catalysis B: Environmental, 297: pp. 120396, 2021.
- [8] Tong, X., Y. Ma, and Y. Li, *Biomass into chemicals: Conversion of sugars to furan derivatives by catalytic processes*. Applied Catalysis A: General, 385(1-2): pp. 1-13, 2010.
- [9] Deng, F. and A.S. Amarasekara, *Catalytic upgrading of biomass derived furans*. Industrial Crops and Products, 159: pp. 113055, 2021.
- [10] Pardo, F., et al., *Assessment of organic solvents for 2, 5-furandicarboxylic acid (FDCA) and distribution in water/cyclohexanone biphasic system*. Journal of Molecular Liquids, 409: pp. 125436, 2024.
- [11] Triebl, C., V. Nikolakis, and M. Ierapetritou, *Simulation and economic analysis of 5-hydroxymethylfurfural conversion to 2, 5-furandicarboxylic acid*. Computers & chemical engineering, 52: pp. 26-34, 2013.
- [12] Li, Z., et al., *Base metal catalyzed oxidation of 5-hydroxy-methyl-furfural to 2, 5-furandicarboxylic acid: A review*. Catalysis Today, 408: pp. 64-72, 2023.
- [13] Pandey, S., et al., *Base-free synthesis of renewable furan-2, 5-dicarboxylic acid (FDCA) over an earth-abundant magnetic catalyst*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(3): pp. 112763, 2024.
- [14] van Putten, R.-J., et al., *Hydroxymethylfurfural, a versatile platform chemical made from renewable resources*. Chemical reviews, 113(3): pp. 1499-1597, 2013.
- [15] Liu, H., et al., *Catalyst design strategy toward the efficient heterogeneously-catalyzed selective oxidation of 5-hydroxymethylfurfural*. Green Energy & Environment, 7(5): pp. 900-93, 2022.
- [16] Wu, S., et al., *Efficient Synthesis of 2, 5-Furandicarboxylic Acid (Fdca) from Corncob Biomass Using Ru/C and Sulfonated Carbon Catalysts in a One-Pot System*. C and Sulfonated Carbon Catalysts in a One-Pot System. 2024.
- [17] Takagaki, A., et al., *One-pot synthesis of 2, 5-diformylfuran from carbohydrate derivatives by sulfonated resin and hydrotalcite-supported ruthenium catalysts*. ACS Catalysis, 1(11): pp. 1562-1565, 2011.

- [18] Jiang, B., et al., *Preparation of 2, 5-Furandicarboxylic Acid (Fdca) Through Continuous Flow Oxidation of 5-Hydroxymethylfurfural (Hmf) Under Hypoxic Condition*. Available at SSRN , pp. 5071755, 2024.
- [19] Davidson, M.G., et al., *Production of HMF, FDCA and their derived products: A review of life cycle assessment (LCA) and techno-economic analysis (TEA) studies*. Green Chemistry, 23(9): pp. 3154-3171, 2021.
- [20] Prasad, S., et al., *Recent advances in the production of 2, 5-furandicarboxylic acid from biorenewable resources*. Materials Science for Energy Technologies, 6: pp. 502-521, 2023.
- [21] Alipour, S., et al., *Techno-economic assessment of the AHP based selected method for separating formic acid from an aqueous effluent*. Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 56(1): pp. 105-121, 2022.
- [22] Alipour, S., E.Sagir, and A. Sadeghi, *Multi-criteria decision-making approach assisting to select materials for low-temperature solid oxide fuel cell: Electrolyte, cathode & anode*. International Journal of Hydrogen Energy, 47(45): pp. 19810-19820, 2022.
- [23] Karimi, A., et al., *Using the Analytical Hierarchy Process to Study the Industrial Air Pollution Control Equipment: Optimal Choice*. Farayandno, 17(79): pp. 5-14, 2022.
- [24] Amir Atashani, M., M. Moshdeei, and A.A. Mahmoud Zadeh, *Prioritization of management accounting techniques on National Iranian Oil Refining and Distribution Company using the analytic hierarchy process (AHP) method*. Farayandno, 9(48): pp. 79-92, 2015.
- [25] Ho, W., *Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review*. European Journal of Operational Research, 186(1): pp. 211-228, 2008.
- [26] Razi, P., et al. *Selection of best consultant by using analytical hierarchy process (AHP)*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*., IOP Publishing, 2020.
- [27] Moslem, S., *A novel parsimonious spherical fuzzy analytic hierarchy process for sustainable urban transport solutions*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 128: pp. 107447, 2024.
- [28] Haktanır, E. and C. Kahraman, *Integrated AHP & TOPSIS methodology using intuitionistic Z-numbers: An application on hydrogen storage technology selection*. Expert Systems with Applications, 239: pp. 122382, 2024.
- [29] Čosović, E., I. Mihajlović, and V. Spasojević Brkić. *Multi-Criteria Selection of Suppliers Using the AHP Method and the Expert Choice Software Package*, in *International May Conference on Strategic Management—IMCSM23 May, Bor, Serbia, 2023*.
- [30] Ahadi, P., et al., *Optimal site selection for a solar power plant in Iran via the Analytic Hierarchy Process (AHP)*. Renewable Energy, 215: pp. 118944, 2023.
- [31] Mousavi, S., et al. *A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy*. in *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*. IEEE, 2009.
- [32] Guan, W., et al., *Hierarchical porous bowl-like nitrogen-doped carbon supported bimetallic AuPd nanoparticles as nanoreactors for high efficient catalytic oxidation of HMF to FDCA*. Journal of Catalysis, 396: pp. 40-53, 2021.
- [33] Rosatella, A.A., et al., *5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: Biological properties, synthesis and synthetic applications*. Green chemistry, 13(4): pp. 754-793, 2011.
- [34] Alipour, S., A. Karimi, and C. Savari, *Techno-economic analysis of small scale electricity generation from the lignocellulosic biomass*. Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 52(2): pp. 193-200, 2018.
- [35] Alipour, S., A. Ghaflebaashi, and C. Savari, *Techno-Economic Analysis of the Levulinic Acid Synthesis from Monosaccharides*. Iranian Chemical Engineering Journal, 20(118): pp. 7-21, 2021.