



## بررسی فنی و اقتصادی تولید انرژی تجدیدپذیر از بیوگاز تولید شده در تصفیه خانه های فاضلاب (مطالعه موردی: شرکت آبفا مشهد)

جواد براتی<sup>1</sup>، مریم رسول زاده<sup>2\*</sup>، علیرضا صدقیان<sup>3</sup>، سودابه سعیدی<sup>4</sup>، مهشید سامی<sup>5</sup>، ناهید رجبزاده<sup>6</sup>

1- استادیار، گروه پژوهشی اقتصاد، سازمان جهاددانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران.

2- دانشجوی دکتری اقتصاد، گروه پژوهشی اقتصاد، سازمان جهاددانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران

3- کارشناس ارشد عمران، مدیر دفتر انرژی شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.

4- کارشناس ارشد عمران، مدیرعامل شرکت فرآیند زیست پویا، مشهد، ایران.

5- کارشناس ارشد اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

6- دکتری اقتصاد، کارشناس شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.

\*ایران، مشهد، کد پستی 9177949367، [Maryam.Rasoulzadeh@mail.um.ac.ir](mailto:Maryam.Rasoulzadeh@mail.um.ac.ir)

چکیده:

تولید انرژی یکی از مهمترین نیازهای کنونی جهان است، کاهش منبع سوختهای فسیلی و ناترازی انرژی، نیاز به تولید انرژیهای تجدیدپذیر را دو چندان نموده است. یکی از منابع تجدیدپذیر، تولید انرژی حاصل از بیوگاز پسماندها می باشد. در این تحقیق بیوگاز حاصل از لجن فاضلاب شهری، برآورد شده و میزان برق تولیدی آن محاسبه و با توجه به قیمت برق تجدیدپذیر و هزینه ها و درآمدهای اجرای چنین پروژه های، محاسبات آن در اکسل پیاده سازی شد. برای آنکه نتایج، قابل تعمیم به هر شرایطی و هر موقعیت مکانی و زمانی باشد، اکسل «کاربردوست» بوده و بر اساس اصول مندرج در مراجع علمی، مشخصات مورد نیاز برای تولید انرژی، در آن پیاده سازی شد. کاربر (یا تصمیم گیرنده و یا سرمایه گذار)، با وارد کردن مشخصات لازم، در خروجی، میزان برق تولیدی و میزان درآمد حاصل از آن را مشاهده می نماید و سپس با محاسبه میزان هزینه ثابت و هزینه متغیر سالانه و وارد نمودن آن در اکسل، در خروجی، شاخص های اقتصادی مانند قیمت تولیدشده هر کیلووات، نرخ بازده داخلی (IRR)، دوره بازگشت سرمایه، ارزش حال خالص پروژه (NPV)، مشاهده می نماید. نمونه این تحقیق یکی از تصفیه خانه های فاضلاب شهر مشهد است، نتایج نشان داد که قیمت تمام شده برق به این روش، برابر 36318 ریال برای هر کیلووات بوده که در مقایسه با متوسط نرخ خرید برق تجدیدپذیر در سال 1402 که برابر 21800 ریال است؛ توجیه پذیری اقتصادی اجرای چنین پروژه های را برای سرمایه گذار از بین خواهد برد، لذا پیشنهاداتی در این زمینه در تحقیق ارائه گردید.

کلید واژگان: آب و فاضلاب، بیوگاز، انرژی تجدیدپذیر، مشهد

## Technical and economic study of energy production from biogas produced in wastewater treatment plants (case study: water and wastewater company of mashhad)

Javad Barati<sup>1</sup>, Maryam Rasoulzadeh<sup>2\*</sup>, Alireza Sedeqian<sup>3</sup>, Soudabe Saedi<sup>4</sup>, Mahshid Sami<sup>5</sup>, Nahid Rajabzadeh<sup>6</sup>

1- Assistant Professor, Economics Research Department, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

2- PHD Student of Economics, Economics Research Department, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Ir.

3- Master of Civil Engineering, Director of Energy Office of Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

4- Master of Civil Engineering, CEO of Biodynamic Process Company, Mashhad, Iran.

5- Master of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

6- PhD in Economics, Expert of Water and Wastewater Company of Mashhad, Mashhad, Iran.

\*Post Code:9177949367, Mashhad, Iran, [Maryam.Rasoulzadeh@mail.um.ac.ir](mailto:Maryam.Rasoulzadeh@mail.um.ac.ir)

Received: 24 August 2024 Accepted: 11 March 2025

**Abstract:**

Energy production is one of the most important current needs of the world, the reduction of fossil fuel sources and energy imbalance has doubled the need for renewable energy production. In this research, the biogas obtained from urban sewage sludge, the estimation and the amount of electricity produced was calculated and according to the price of renewable electricity and the costs and revenues of implementing such a project, its calculations were implemented in Excel. The user (or decision-maker or investor), by entering the necessary specifications, sees the amount of electricity produced and the amount of income from it in the output, and then calculates the amount of fixed cost and annual variable cost and enters it. In Excel, in the output, economic indicators such as the producer price of each kilowatt, the internal rate of return (IRR), the investment return period, and the project's net present value (NPV) can be seen. The example of this research is one of the wastewater treatment plants in Mashhad, the results showed that the cost of electricity in this way was equal to 36318 Rials per kilowatt, which is compared to the average purchase rate of renewable electricity in 1402, which is equal to 21800 Rials.; The economic justification of the implementation of such a project will be destroyed for the investor, so suggestions in this field were presented in the research.

**Key Words:** Water and sewage, biogas, renewable energy, Mashhad

**1-مقدمه**

درک چالش‌های تکنولوژیکی و اقتصادی دستیابی به سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر بسیار مهم است. هنگامی دستیابی به منابع انرژی پایدار انگیزه ایجاد خواهد کرد که دارای هزینه‌های اقتصادی معقول باشد. راه‌حلهایی برای دستیابی به این تعادل (تولید انرژی پاک همراه با مقرون به صرفه بودن آن)، در مطالعات کنونی، در حال بررسی می‌باشند [1]. در دوران کنونی، افزایش آگاهی نسبت به گرمایش جهانی و احتمال اینکه سوخت‌های فسیلی - به ویژه نفت خام و گاز طبیعی - کمتر در دسترس بوده و پرهزینه‌تر میشوند، سبب شده است که همه کشورها به دنبال گزینه‌های خود برای حفظ عرضه انرژی در دهه‌های آینده باشند. لذا کشورها به دنبال آنند که از سایر منابع بتوانند تامین انرژی پایدار را برای خود انجام دهند. نرخ تولید لجن فاضلاب در سطح جهان به دلایلی همچون رشد جمعیت، شهرنشینی سریع، توسعه صنعتی و افزایش درصد جمعیت متصل به سیستم فاضلاب (جمع‌آوری و تصفیه مناسب فاضلاب) با بهبود تاسیسات تصفیه فاضلاب در حال افزایش است. به عنوان مثال نرخ تولید SS<sup>1</sup> در 27 کشور اتحادیه اروپا (EU-27) از 6.10 به 8.5 میلیون تن جامد خشک (DS) در سال بین سال‌های 2010 تا 2018 افزایش یافته است، پیش‌بینی می‌شود تا سال 2030 به حدود 10 میلیون تن DS در سال با توجه به نرخ تولید سرانه و رشد جمعیت مورد انتظار برسد [2].

انرژی زیست توده بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان است و بیش از 60 درصد انرژی تجدیدپذیر مصرف شده در اتحادیه اروپا را تامین می‌کند [3]. در ژاپن، حدود 24٪ از لجن فاضلاب به عنوان انرژی زیست توده (16٪ بیوگاز + 8٪ سوخت لجن) دوباره استفاده می‌شود [4]. از آنجایی که تمایل شدیدی به استفاده از سیستم‌های انرژی

تجدیدپذیر در محدوده ساختمان‌های مسکونی در شهرها، وجود دارد، این سیستم‌ها باید دوباره ارزیابی و طراحی شوند تا از منابع انرژی تجدیدپذیر موجود در سایت‌ها حداکثر استفاده را ببرند [1].

در این راستا شرکت‌های آب و فاضلاب می‌توانند نقش مهمی را به ویژه در کلانشهرها به دلیل جمعیت زیاد و به تبع وجود حجم فاضلاب بیشتر، بازی کنند. شرکت آبفا مشهد دارای چهار تصفیه خانه فاضلاب در چهار نقطه شهر مشهد (خین عرب، التیمور، پرکند 1 و 2 و اولنگ) بوده و یک تصفیه خانه در حال ساخت می‌باشد که در منطقه طبرسی واقع شده است که به دلیل حجم فاضلاب ورودی به این تصفیه خانه‌ها، امکان بررسی تولید انرژی را دارای توجیه می‌سازد. تحقیق حاضر، با هدف شناسایی پتانسیل شرکت آب و فاضلاب مشهد در خصوص استحصال انرژی‌های پاک و پایدار از تصفیه بی‌هوازی لجن فاضلاب انجام شده و در این راستا، با یک رویکرد اقتصادی، امکان‌سنجی فنی این پروژه را بررسی کرده است.

**2-پیشینه تحقیق**

پژوهش‌های متعددی موضوع تولید انرژی از شبکه آب و فاضلاب را بررسی کرده‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود؛ برناردو و همکاران (2022)، به بررسی تصفیه فاضلاب و آب با تولید انرژی زیستی و جذب و ذخیره کربن پرداختند. نتایج تولید برق، شامل تولید 13.21 مگاوات با انتشار کربن 9.957- در ساعت است [5]. لیو و همکاران (2023)، به ارزیابی انرژی، محیط زیست و اقتصاد فناوری‌های سوزاندن لجن فاضلاب در چین، پرداختند. نتایج LCA نشان می‌دهد که شاخص زیست محیطی جامع زغال سنگ و گاز طبیعی تقریباً 100 برابر بزرگتر از زیست توده است [6]. وانگ و وناناکوبو (2021)، به معرفی سیستم‌های استفاده از انرژی لجن فاضلاب در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در شهرهای بزرگ ژاپن پرداختند. نتایج نشان داد که 1) عدم استفاده از هضم

<sup>1</sup> Suspended Solids

انرژی تحت شرایط اختلال را به عنوان یک مدل استوار سناریو محور، بررسی کردند [16].

## 2- مبانی و روشها

### 2-1- مشخصات و نحوه تولید بیوگاز

گاز حاصل از تخمیر (Fermentation) بی‌هوازی مواد آلی تولیدی توسط فضولات حیوان، گیاه و انسان توسط باکتری‌ها را اصطلاحاً بیوگاز (Biogas) می‌نامند. بیوگاز عمدتاً شامل متان، دی‌اکسید کربن و ازت است. این گاز یکی از منابع تجدید پذیر انرژی است تولید بیوگاز در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری، از هضم بی‌هوازی لجن در هاضم‌ها صورت می‌پذیرد. لجن پیش از وارد شدن به منبع‌های هضم لجن نزدیک به 60 تا 80 درصد مواد آلی تجزیه‌پذیر دارد. لجن تازه از نظر حجمی نزدیک به یک درصد کل فاضلاب را شامل می‌شود، اما تصفیه آن بسیار پرهزینه و پیچیده است. هزینه تأسیسات هضم لجن گاهی نزدیک به نصف تمام هزینه یک تصفیه‌خانه را در برمی‌گیرد نسبت گاز متان به‌دست‌آمده از هضم لجن فاضلاب شهری، 65 تا 70 درصد و گاز کربنیک 30 تا 35 درصد کل گاز تولیدشده است [17].

### 2-2- ارزیابی فنی روش بیوگاز

«فاضلاب» ورودی به هر کدام از تصفیه‌خانه‌ها، به دلیل متفاوت بودن فرآیند و نوع تصفیه، تولید «لجن» با مقدار و مشخصات متفاوتی را به همراه خواهد داشت و اگر لجن حاصله، وارد هاضم‌های بی‌هوازی شود، «بیوگاز» با مشخصات مختص آن روش (وجود متان با درصد‌های مختلف) را نتیجه خواهد داد که بر روی میزان استخراج و استحصال انرژی از آن، اثرگذار خواهد بود. بنابراین در این تحقیق، دو مرحله باید مورد توجه قرار گیرد: 1- مقدار لجن به دست آمده از فاضلاب 2- مقدار بیوگاز به دست آمده از لجن؛ در واقع در این دو مرحله باید «مشخصات لجن» به دست آمده و «مشخصات بیوگاز» به دست آمده بر اساس هر کدام از روشهای تصفیه، و برحسب فرمول‌ها به دست آمده از مراجع علمی، تدوین گردد.

### 2-2-1- مرحله اول: میزان لجن به دست آمده از تصفیه فاضلاب

فرمول تولید لجن روزانه یک تصفیه خانه فاضلاب به صورت ذیل است [19].<sup>1</sup>

$$P_{X,TSS} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + K_d(SRT)} \times \frac{1}{0.85} + \frac{f_d K_d Y Q(S_0 - S)(SRT)}{1 + K_d(SRT)} \quad (1)$$

$$\times \frac{1}{0.85} + QX_{0,i} + Q(TSS_0 - VSS_0)$$

در فرمول بالا؛

1-ویژگیهای پساب ته نشین شده اولیه شامل؛  
Q=دبی فاضلاب<sup>2</sup> (m<sup>3</sup>/d)

یک گزینه برتر در سوزاندن با سیستم های تولید انرژی حرارتی زباله است و 2) استفاده از هضم در سیستم‌های تبدیل سوخت جامد، برتر است [7]. کارنتینو و همکاران (2023)، به مدل‌سازی پیش‌بینی برای بازیافت انرژی از گازی شدن لجن فاضلاب پرداختند آنان بیان داشتند که بازیافت انرژی از SS از طریق راه حل پیشنهادی ممکن است حدود 50٪ تقاضای انرژی الکتریکی برای راه اندازی تصفیه خانه های فاضلاب و 60 تا 75٪ از انرژی حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن حرارتی SS آگیری مکانیکی برای تبدیل به گاز را تامین کند [8].

حمله‌دار و همکاران (1397)، استفاده از پتانسیل‌های صنعت آب و فاضلاب را برای تولید پراکنده انرژی پاک مورد بررسی قرار داده‌اند و بیان داشتند که انرژی هیدرولیکی بدست آمده از توربینهای آبی، میتواند برای صنایع کوچک روستایی یا صنایع خرد یا حتی پمپاژ آب مصرفی استفاده شود [9]. قوامی و همکاران (1403)، بیان نمودند که نیروگاه های بیوگاز می‌توانند از طریق ادغام پیشنهادی به پالایشگاه‌های زیستی چند محصولی تبدیل شوند [10]. طریقی و کلوری (1402)، بیان داشتند که نیروگاه‌های تجاری بیوگاز نیازمند مشوق‌های مالی فراوانی هستند. علاوه بر این کمبود مواد قابل هضم بسیار ارزان محلی باعث کاهش بهره وری بیوگاز، بویژه برای نیروگاه‌های بزرگ بیوگازی (بزرگ تر از 1 مگاوات) می‌شود. بنابراین نوآوری‌هایی برای افزایش بهره‌وری، مورد نیاز است. دریاییگی و ربیعی (1400) میزان بیوگاز قابل استحصال از مواد زاید فسادپذیر روستای ایبانه را 4.24 میلیون متر مکعب در سال برآورد کردند. از منبع فوق بطور میانگین سالیانه 86.15 میلیون متر مکعب متان قابل دریافت است که این حجم متان معادل 68.342 مگاژول انرژی خواهد بود [11]. پور صبا و عباسی (1400)، عنوان داشتند که روش‌های بهبود دهنده کیفیت بیوگاز را می‌توان در سه دسته پیش تصفیه، فرآیند اصلی و پس تصفیه، تقسیم‌بندی کرد؛ روش‌های فرآیند اصلی به علت سهولت در بهره‌برداری، بازده بالا و توجه اقتصادی، نسبت به دو روش دیگر در صنعت کاربرد بیشتری دارند. [12] سلمانی و همکاران (1396) به بررسی امکان‌سنجی و پتانسیل‌سنجی احداث دو واحد همزمان تولید حرارت و برق با بیوگاز در تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کاشان پرداخته‌اند. هزینه‌ها و منافع حاصل از تولید این نوع سوخت به لحاظ اقتصادی سنجیده شده است بطوریکه دوره بازگشت سرمایه حدوداً 4 سال برآورد گردید [13]. صادقی و همکاران (1395)، به ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی تولید انرژی از فاضلاب شهر کرمان پرداختند و سناریوی بازیافت انرژی و فروش برق تولیدی به شبکه را به عنوان سناریو اقتصادی پروژه اعلام نمودند [14]. فریدی زاد و همکاران (1399)، فرایند لجن فعال با نرخ بالا را بینشی جدید برای بازیابی انرژی از فاضلاب شهری، اشاره کردند که در دهه های اخیر به دلیل افزایش جمعیت، کاهش منابع نفتی و تولید انبوه فاضلاب شهری دارای اهمیت است [15]. گیلانی و صاحبی (1400)، در تحقیقی زنجیره تامین لجن فاضلاب با رابطه متقابل آب و

<sup>2</sup> wastewater flowrate

<sup>1</sup> <https://www.lenntech.com/wtwp/calculate-daily-sludge-production.htm>

$$f_d = \text{کسری از زیست توده که به عنوان بقایای سلولی باقی می ماند (g VSS/g VSS)}$$

با توجه به ضرایب بالا می توان، مقدار لجن روزانه ( $P_{X,T,VSS}$ ) بر حسب (kg VSS/d) و یا مقدار لجن روزانه ( $P_{X,T,TSS}$ ) را بر حسب (kg TSS/d) به دست آورد. خلاصه آیت‌های مورد نیاز برای محاسبه لجن روزانه را می توان در جدول ذیل بیان کرد.

$$S_0 = \text{غلظت سوبسترای محلول نفوذی}^1 \text{ (BOD or bsCOD g/m}^3\text{)}$$

$$X_{0,t} = \text{غلظت nbVSS در پساب}^2 \text{ (mg/l یا g/m}^3\text{)}$$

$$i\text{TSS} = \text{مواد معدنی بی اثر کل جامدات معلق}^3 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$X_T = \text{غلظت کل MLVSS}^4 \text{ (mg/l یا g/m}^3\text{)}$$

$$\text{SRT} = \text{زمان ماند مواد ته نشین شده}^5 \text{ (d)}$$

$$2\text{-ضرایب سینتیکی}^6$$

$$K = \text{حداکثر نرخ استفاده از بستر محلول}^7 \text{ (g COD/g}\cdot\text{d)}$$

$$Y = \text{بازده زیست توده}^8 \text{ (g VSS/g COD used)}$$

$$K_d = \text{ضریب فروپاشی درون ز}^9 \text{ (g VSS/g VSS}\cdot\text{d)}$$

$$K_s = \text{ثابت سرعت نیمه}^{10} \text{ (g COD/m}^3\text{)}$$

جدول 1 مشخصات وارد شده برای محاسبه لجن تولیدی روزانه

نماد	شرح	واحد
Q	influent flowrate	[m <sup>3</sup> /d]
Y	biomass yield	[g VSS/g COD used]
S <sub>0</sub>	influent soluble substrate concentration (bsCOD)	[g bsCOD/m <sup>3</sup> ]
S	effluent soluble substrate concentration (bsCOD)	[g bsCOD/m <sup>3</sup> ]
k <sub>d</sub>	endogenous decay coefficient	[g VSS/g VSS·d]
SRT	Sedimentation Retention Time	[d]
f <sub>d</sub>	fraction of biomass that remains as cell debris	[g VSS/g VSS]
X <sub>0,t</sub>	nbVSS concentration in influent	[g nbVSS/m <sup>3</sup> ]
VSS <sub>0</sub>	influent Volatile Suspended Solids	[g VSS/m <sup>3</sup> ] or [mg/l]
TSS <sub>0</sub>	influent Total Suspended Solids	[g TSS/m <sup>3</sup> ] or [mg/l]

ماخذ: مت کف و ادی، [20] 2003 <https://www.lenntech.com/wwtp/calculate-daily-sludge-production.htm>

هضم بیهوازی (منظور روزهای اولیه راه اندازی هاضم می باشد) کم بوده و بعد از گذشت چندین روز مقدار آن افزایش پیدا می کند. هنگامیکه هاضم به شرایط پایدار هضم بیهوازی رسیده باشد مقدار تغییرات تولید بیوگاز کاهش پیدا میکند.

همانگونه که بیان شد، تفاوت در فرایندهای تصفیه فاضلاب، منجر به متفاوت بودن کیفیت لجن تولید شده، می شود. با توجه به این دو نوع لجن، می توان مشخص کرد که لجن تولید شده از هر یک از فرایندهای ذکر شده، دارای چه سطحی از پتانسیل، برای بکارگیری در فرایند هضم بی‌هواری در راستای تولید متان (حاصل از بیوگاز)، برای استخراج انرژی الکتریکی می باشد [20].

### 2-2-2-1-میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن

استخراج شده از روش تصفیه فاضلاب MLE

میزان بیوگاز تولید شده برای لجن حاصل از روش تصفیه MLE با گذشت زمان افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است. این موضوع می تواند بیانگر این مطلب باشد که به علت نوع لجن مورد استفاده (نسبت کم کربن به نیتروژن) فعالیت میکروارگانیسمها در حالت پایدار نمی باشد، به طوریکه فعالیت میکروارگانیسمها در ابتدا کم و سپس با گذشت زمان افزایش پیدا

### 2-2-2-2-مرحله دوم: میزان بیوگاز به دست آمده از لجن

در این مرحله برای آنکه میزان بیوگاز به دست آمده از لجن را بر حسب هر روش تصفیه، در تصفیه خانه های مشهد مشخص گردد از مطالعه قبلی که روی مقدار لجن استخراجی و مشخصات آن، از بیوگاز، کار شده بود. استفاده گردید. مقدار بیوگاز استخراجی از لجن را می توان بر حسب فرمول های کتاب مرجع [19] استخراج نمود. از سوی دیگر، همانطور که بیان شد، بر اساس طرح پژوهشی که در شرکت آبفا مشهد در سال 1398 انجام شده است [20]، و مطالعات آزمایشگاهی لازم را در بردارد، از 5 تصفیه خانه فاضلاب شهری مشهد (پرکنند 1 و 2، اولنگ، التیمور و خین عرب) تنها دو تصفیه خانه «التیمور و خین عرب» که نوع تصفیه آنها به روش MLE<sup>11</sup> و SBR<sup>12</sup> است، ویژگیهای شیمیایی لجن تولیدشده در آنها، قابلیت استحصال انرژی از بیوگاز را دارا است، لذا در ادامه، مشخصات آزمایشگاهی، مرتبط با دو نوع لجن حاصل از دو روش تصفیه فاضلاب MLE و SBR آورده شده است؛ به استناد این گزارش و همچنین کتاب مرجع اصلی مرتبط با مهندسی فاضلاب [19]، میزان بیوگاز تولید شده در زمانهای مختلف هضم متفاوت می باشد. این مقدار در ابتدای فرایند

<sup>6</sup> Kinetic Coefficients

<sup>7</sup> maximum rate of soluble substrate utilization

<sup>8</sup> biomass yield

نسبت مقدار زیست توده تولید شده به مقدار بستر مصرفی (گرم زیست توده / گرم بستر) به عنوان بازده زیست توده تعریف می شود و معمولاً نسبت به دهنده الکترون مورد استفاده

$$\text{biomass yield } Y = \frac{\text{g biomass produced}}{\text{g substrate utilized}}$$

<sup>9</sup> endogenous decay coefficient

<sup>10</sup> half-velocity constant

<sup>11</sup> Modified Ludzack Ettinger

<sup>12</sup> Sequencing Batch Reactors

<sup>1</sup> influent soluble substrate concentration (bsCOD)

<sup>2</sup> nbVSS concentration in influent (nbVSS=nonbiodegradable Volatile Suspended Solids)

غلظت nbVSS ممکن است در محدوده 60 تا 100 میلی گرم در لیتر باشد و پس از

تصفیه اولیه ممکن است بین 10 تا 40 میلی گرم در لیتر باشد

<sup>3</sup> inert inorganics Total Suspended Solids - (iTSS = TSS-VSS)

<sup>4</sup> total MLVSS concentration (MLVSS = Mixed liquor volatile suspended solids)

<sup>5</sup> Sedimentation Retention Time (SRT)

SRT میانگین زمانی است که مواد جامد لجن فعال در سیستم هستند. یک پارامتر طراحی

و عملیاتی مهم برای فرآیند لجن فعال است و معمولاً بر حسب روز بیان می شود.

آزمایش که دارای نسبت کم کربن به نیتروژن میباشد، میزان تولید بیوگاز به شدت پایین بوده است.

با مقایسه میزان تولید بیوگاز برای دو لجن به کار رفته در آزمایش، مشخص شده است که میزان تولید بیوگاز در هاضم لجن حاصل از روش تصفیه MLE (تقریباً 50 لیتر در 12 روز) حدوداً 8 برابر بیوگاز تولید شده در هاضم لجن حاصل از روش تصفیه SBR است (تقریباً 5 لیتر در 12 روز). جدول ذیل، مشخصه های این دو نوع لجن را نشان می دهد [20].

جدول 2 میزان مشخصه های لجن آزمایش شده حاصل از دو روش تصفیه فاضلاب SBR و MLE

روش تصفیه MLE	روش تصفیه SBR	پارامتر	پارامتر
10760	5402	VSS (mg/L)	مقدار لجن مورد استفاده در دوره سوم
27290	19990	TSS (mg/L)	
18225	17025	VSS (mg/L)	مقادیر در ابتدای دوره سوم (روز 24)
6.19	7.33	PH	
9940	8040	TSS (mg/L)	
7316	6110	VSS (mg/L)	مقادیر در انتهای دوره سوم (روز 36)
6.22	7.32	PH	
26	44		VSS Removal (%)

ماخذ: چهار طاقی و همکاران، 1398 [20].

$$f_{biogass} \left( \frac{L}{gVSS_{removed}} \right) = 0.04$$

مقدار تولید بیوگاز در کتاب مرجع برابر  $\left( \frac{L}{gVSS_{removed}} \right)$  تا 0.75 تا 1.12 می باشد [19]. با مقایسه مقادیر به دست آمده و مقایسه با منابع مرجع مشخص می شود که مقدار تولید بیوگاز برای نوع لجن حاصل از روش تصفیه SBR، ناچیز و برای لجن حاصل از روش تصفیه MLE، کمتر از حد بیان شده، در کتاب مرجع، می باشد.

میزان تولید بیوگاز به ازای حذف VSS برای لجن حاصل از روش تصفیه SBR بسیار پایین میباشد که بیانگر نامناسب بودن استفاده از آن برای تولید بیوگاز است. با توجه به توضیحات داده شده میتوان به طور خلاصه بیان کرد که میزان تولید بیوگاز به «راندمان حذف VSS» و همچنین «مقدار بیوگاز تولید شده به ازای VSS حذف شده» بستگی دارد. برای مقایسه کلی میان دو لجن و با حالت تئوری، با در نظر داشتن یک گرم VSS وارد شده به هاضم بیهوازی، مقدار بیوگاز تولید شده برای هر حالت، با ضرب در مقدار VSS (در اینجا یک گرم) در راندمان حذف و همچنین مقدار بیوگاز تولید شده به ازای VSS حذف شده، به دست آمده است.

همانطور که نتایج به دست آمده نشان می دهد، مقدار تولید بیوگاز به روش تئوری، در مقایسه با روش آزمایشگاهی، برای لجن حاصل از روش تصفیه MLE و SBR، به ترتیب در حدود 25 و 4 برابر است. این امر نشان دهنده آن است که لجن حاصل از تصفیه فاضلاب به روش SBR، شرایط مناسبی برای به کارگیری در روش هضم بیهوازی ندارد اما این موضوع برای لجن حاصل از روش تصفیه فاضلاب MLE، نیاز به ارزیابی

کرده که نتیجه آن افزایش تولید بیوگاز میباشد. همچنین در روزهای آزمایش 32 به بعد، مقدار تولید بیوگاز کاهش یافته که میتواند به علت کمبود مواد غذایی برای فعالیت میکروارگانیسمها و یا عواملی دیگر باشد.

### 2-2-2-2-2-2 میزان بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم برای لجن استخراج شده از روش تصفیه فاضلاب SBR

میزان تولید بیوگاز برای لجن حاصل از روش تصفیه فاضلاب SBR، از ثبات نسبی در طول آزمایش برخوردار بوده، اما با توجه به نوع لجن، که از فرایند هوادهی گسترده به دست آمده و همچنین نوع مورد استفاده در

### 2-2-2-3-2-2-2 تولید بیوگاز بر حسب VSS

یک معیار متداول برای محاسبه مقدار تولید بیوگاز، بیان مقدار بیوگاز تولید شده به ازای مقدار تخریب مواد VSS میباشد. با توجه به روش پیشنهاد شده در کتاب مرجع [24]، در ابتدا نیاز است که کل VSS موجود در ابتدای دوره سوم هضم محاسبه گردد. پس از انجام محاسبات لازم، مقدار راندمان حذف VSS برای لجن های حاصل از دو روش تصفیه فاضلاب MLE و SBR به ترتیب 26 و 44 درصد به دست آمده است. با توجه به راندمان حذف مواد VSS به دست آمده و همچنین مقدار جمعی بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم، میتوان معیار تولید بیوگاز را بر حسب مقدار VSS تخریب شده بیان کرد که به صورت زیر می باشد [20]:

$$f_{biogass} \left( \frac{L}{gVSS_{removed}} \right) = \frac{V_{biogass}(L)}{VSS_{feed}(g)VSS_{removal}} \quad (2)$$

که در رابطه بالا؛

$$V_{biogass} = \text{مقدار بیوگاز تولید شده در دوره آخر هضم}$$

$$VSS_{feed}(g) = \text{مقدار VSS کل در دوره سوم هضم}$$

$$f_{biogass} = \text{تولید بیوگاز بر حسب راندمان حذف VSS می باشد.}$$

مقدار بیوگاز تولید شده، از لجن حاصل از روش تصفیه MLE:

$$f_{biogass} \left( \frac{L}{gVSS_{removed}} \right) = 0.44$$

مقدار بیوگاز تولید شده، از لجن حاصل از روش تصفیه SBR:

نوع لجن همواره کمتر از 6 بوده که یک عامل نامناسب برای تولید بیوگاز می‌باشد.

### 2-2-2-5- میزان انرژی الکتریکی قابل استحصال از بیوگاز

همانگونه که در قسمت قبل بیان شد، بر اساس آزمایشات انجام شده، مقدار بیوگاز تولیدی از لجن تولید شده حاصل از روش تصفیه MLE برابر  $\frac{L}{gVS_{removed}} \times 0.44$  به دست آمده است که اگر این مقدار ضربدر 65٪ شود، مقدار گاز متان مشخص می‌گردد. مقدار TSS لجن خام برابر با 16.2 درصد به دست آمده است که از این عدد، در حدود 0.65 آن می‌تواند حاوی محتویات VSS باشد. راندمان حذف VSS نیز برابر 26 درصد است [20]. اگر در تصفیه خانه، دبی روزانه، در حدود 183 مترمکعب از لجن تغلیظ شده باشد، آنگاه طبق فرمول و محاسبات ذیل، مقدار متان تولیدی در روز، برابر عدد 573 کیلوگرم، به دست می‌آید:

$$V_{CH_4} = f_{biogass} \times \left( \frac{L}{gVS_{removed}} \right) \times 65\% \quad (3)$$

$V_{CH_4}$  = مقدار گاز متان تولیدی (کیلوگرم)

$f_{biogass}$  = راندمان تولید بیوگاز بر حسب VSS حذف شده (مترمکعب

بر کیلوگرم یا لیتر بر گرم) = 0.44

$L$  = متوسط دبی روزانه لجن تغلیظ شده (مترمکعب یا لیتر) = 183

$S_{removal}$  = راندمان حذف VSS حذف شده = 0.26

$V$  = تغذیه در هر لیتر (برابر ضریب 3.33 است) = 3.33

$g$  = محتویات VSS موجود از TSS لجن خام (درصد TSS موجود در لجن

خام، باید ضربدر 0.65 شود) = 0.1053

حال باید این مقدار متان را تبدیل به انرژی الکتریکی (وات) نمود، با توجه به این مقدار متان و با لحاظ آنکه یک مترمکعب متان دارای ارزش حرارتی 33810 کیلوژول است، یا به عبارتی، 1 کیلوگرم متان، 50.3125 مگاژول انرژی تولید می‌کند. تبدیل انرژی با استفاده از رابطه تبدیل  $1 \text{ Kwh} = 3.6 \text{ MJ}$  انجام می‌شود، میزان انرژی الکتریکی قابل استحصال از متان حاصل بیوگاز تولیدی از رابطه ذیل محاسبه می‌شود [21].

$$P_e = \frac{E \times \eta}{M} \quad (4)$$

$P_e$  = میزان انرژی الکتریکی قابل استحصال

$\eta$  = بازده الکتریکی ژنراتور (به طور متوسط 0.75)

$E$  = پتانسیل تولید برق از متان (KWh/kg CH<sub>4</sub>)

$M$  = درصدی از سال که سامانه عملکرد بهینه دارد که 100 درصد فرض شده است.

### 2-3- ارزیابی اقتصادی

در تحقیق حاضر جهت ارزیابی اقتصادی پروژه از شاخص‌های ارزش حال خالص فعلی (NPV)<sup>1</sup>، نرخ بازدهی داخلی (IRR)<sup>2</sup> و دوره بازگشت

اقتصادی دارد و در واقع می‌توان بر روی لجن حاصل از روش تصفیه فاضلاب MLE، برای کسب انرژی الکتریکی متمرکز شد.

لازم به ذکر است که هرچه تعداد دوره‌های آزمایش بیشتر باشد فرایند هضم بیپه‌وایی مهیاتر شده و بیوگاز به مقدار بیشتری تولید می‌گردد. مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته، پیرامون هضم بیپه‌وایی نشان داده، افزایش مدت زمان آزمایش هاضمها (100 روز به بالا)، مقدار تولید بیوگاز را به ازای همان مقدار لجن، در حدود 3 برابر افزایش داده است. اما با توجه به محدودیت‌های موجود در خصوص اجرای هاضمها، در این پروژه تعداد دوره‌های آزمایش 2 تا 3 (بیشترین بازه در حدود 36 روز) دوره در نظر گرفته شد. بنابراین در بررسی اقتصادی هاضمهای بیپه‌وایی لازم است که مقادیر بیوگاز استحصال شده متفاوتی را برای هر کدام از تصفیه خانه ها در نظر گرفت [20]. بیوگاز تولید شده را بر اساس سرانه فاضلاب نیز می‌توان به طور غیر دقیق تخمین زد. در تصفیه اولیه فاضلاب عادی خانگی، مقدار معمول تولید بیوگاز 15 تا 22 مترمکعب به ازای هر 1000 نفر در روز است. در تصفیه ثانویه، این مقدار تا حدود 28 مترمکعب به ازای هر 1000 نفر در روز افزایش می‌یابد [19].

### 2-2-2-4- درصد متان حاصل از بیوگاز

مقدار درصد متان موجود در بیوگازها در مرجع‌های مختلف مقادیر متفاوتی می‌باشد که تابع مواد خام مورد استفاده به‌عنوان ماده اولیه در هاضمها می‌باشد. همانگونه که قبلاً بیان شد در کتاب مرجع [20]، مقدار متان موجود در بیوگاز در حدود 65 تا 70 درصد بیان شده است. درصد متان در نمونه لجن حاصل از روش تصفیه MLE و SBR به صورت جدول ذیل است (در مرحله اول آزمایش، راه‌اندازی هاضمها با لجن خام صورت گرفت، در صورتیکه در مرحله دوم از لجن موجود در هاضم استفاده شد):

تصفیه فاضلاب MLE و SBR		
نوع لجن مورد مطالعه	مرحله دوم (دوره اول 20 روزه، دوره دوم 12 روزه)	درصد متان
لجن حاصل از روش تصفیه MLE	8.3	درصد متان پس از دو دوره 12 روزه = 63.52
لجن حاصل از روش تصفیه SBR	3.08	25.28

ماخذ: چهارطاقی، 1398 [21]

همانطور که در جدول بالا نشان داده شده است درصد متان بسیار پایین می‌باشد. در تحقیقات مختلف آزمایشگاهی، مقادیر مختلفی برای متان موجود در بیوگاز گزارش شده (از 40 تا 75 درصد) که خارج از محدوده 65 تا 70 درصدی ذکر شده در کتاب مرجع [19] می‌باشد. همانگونه که جدول بالا نشان می‌دهد، با افزایش مدت زمان آزمایش، میزان تولید بیوگاز تا چندین برابر افزایش می‌یابد و به عبارتی مقادیر به دست آمده حداقل میزان تولید بیوگاز در هر یک از دو لجن انتخابی را نشان می‌دهد. در آزمایش انجام شده، نسبت کربن به نیتروژن در هر دو

$$A = P \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (7)$$

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (8)$$

A=ارزش یکنواخت سالانه  
P=ارزش حال هزینه‌های ثابت  
F=هزینه‌های ثابت (هزینه‌ای که در سال مبنا انجام می‌شود یا همان هزینه‌های خرید و تهیه)  
i=نرخ تنزیل (که می‌توان برابر نرخ بهره بانکی در نظر گرفت)  
n=سال‌های عمر مفید پروژه  
سپس عدد به‌دست‌آمده برای «اقساط یکنواخت سالانه هزینه‌های ثابت» با «هزینه‌های متغیر» جمع شده و حاصل جمع آن‌ها، تقسیم‌بر مقدار تولید برق در یک سال (برحسب کیلووات ساعت) شده تا قیمت تمام‌شده برای یک کیلووات برق، محاسبه گردد.

### 3-نتایج

در این مقاله همانگونه که بیان شد ابتدا میزان تولید بیوگاز مشخص گردید و سپس مقدا متان استخراجی و انرژی حاصل از آن تخمین زده شد، سپس با توجه به درآمد حاصل از فروش انرژی تولید و هزینه‌های اجرای چنین طرحی، برآورد مالی و اقتصادی نیز از آن انجام پذیرفت.

#### 3-1-برآورد میزان برق تولیدی

در تحقیق حاضر، جهت کاربردی نمودن نتایج تحقیق، اکسلی همانند یک نرم افزار تهیه شد که هدف آن است که کاربر، بتواند با وارد کردن مشخصات لازم برای لجنهای متفاوت حاصل از انواع مختلف روشهای تصفیه (روشهای لاگون، برکه تثبیت، SBR و MLE) در فایل اکسل، خروجی در مورد «میزان بیوگاز تولید شده، میزان متان و سپس میزان برق تولید شده، و اقتصادی بودن و نبودن پروژه»، را مشاهده نماید. لذا با توجه به این هدف، اکسل مورد نظر تهیه شده که در ادامه به ترتیب به جداول و خروجی‌های این اکسل پرداخته می‌شود. در این اکسل با توجه به فرمول ارائه شده در قسمت قبل، کاربر باید «مشخصات فاضلاب ورودی» را وارد نماید (جدول 4) تا «مقدار لجن» تعیین شود و سپس «درصد غلظت مواد جامد (TSS) پس از تغلیظ» را وارد نماید تا «متوسط دبی لجن تغلیظ شده» محاسبه گردد (جدول 5) و در مرحله بعد، کاربر باید «مشخصات لجن تغلیظی» را وارد نماید (جدول 6)، تا مقدار «بیوگاز» حاصل از آن، محاسبه شود (جدول 6) و سپس، بر حسب درصد متان موجود در بیوگاز (که این مورد نیز توسط کاربر قابل تغییر است) «مقدار متان»، مشخص شده و بر اساس فرمول‌های ارائه شده در قسمت قبل، «مقدار برق تولیدی» تعیین می‌گردد که بر اساس نرخ‌های خرید برق تجدیدپذیر به تفکیک ایام سال (که کاربر می‌تواند آنها را نیز تغییر دهد)، درآمدها مشخص میشود (جدول 10) بر اساس آنچه بیان شد، جداول ذیل خروجی‌ها را نشان می‌دهند:

سرمایه (ROI)<sup>3</sup> استفاده می‌شود که هرکدام از شاخص‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

#### 2-3-1-ارزش فعلی خالص (NPV)

ارزش فعلی خالص برابر با کسر ارزش فعلی درآمدها از ارزش فعلی هزینه‌های یک پروژه است که می‌تواند منفی یا مثبت باشد (رابطه 2). مثبت بودن آن به معنی این است که حاصل اجرای یک پروژه در یک دوره مشخص سودآور بوده و منفی بودن به معنی زیانده بودن پروژه است [22]. در رابطه (4) نرخ تنزیل،  $B_t$  و  $C_t$  به ترتیب منافع و هزینه طرح در سال  $t$  می‌باشند. NPV از لحاظ جبری می‌تواند صفر باشد مثبت و یا منفی باشد که اگر مثبت شد دارای توجیه اقتصادی است و چنانچه برابر صفر باشد در مورد رد یا قبول انجام طرح مزبور نمی‌توان به روشنی پاسخ گفت و اجرا و عدم اجرای آن تفاوتی ندارد. اگر (NPV) پروژه‌ای منفی شود توجیه اقتصادی ندارد.

#### 2-3-2-نرخ بازده داخلی (IRR)

منظور از نرخ بازده داخلی نرخ بهره‌ای است که ارزش فعلی درآمدهای یک پروژه را با ارزش فعلی هزینه‌های آن برابر می‌کند (رابطه 5). اگر نرخ بازده داخلی بزرگتر از نرخ بهره بازار باشد، به معنی سودآور بودن طرح بوده و اگر این نرخ کوچکتر از نرخ بهره بازار باشد به معنی زیانده بودن طرح است [22].

$$NPV = \frac{\sum B_t - C_t}{(1+d)^t} = 0 \quad (5)$$

اگر نرخ به‌دست‌آمده بالاتر از نرخ تنزیل ( $d$ ) باشد، پروژه دارای توجیه اقتصادی است و اگر کمتر از آن باشد فاقد توجیه اقتصادی است. به‌طور خلاصه یک پروژه در کلیه نرخ‌های تنزیل کمتر از IRR دارای توجیه اقتصادی و برای کلیه نرخ‌های بالاتر از IRR فاقد توجیه اقتصادی است.

#### 2-3-3-محاسبه دوره بازگشت سرمایه (ROI) با استفاده از روش ارزش فعلی:

ROI همان نسبت سود حاصل از سرمایه‌گذاری به میزان هزینه اولیه است. چنانچه ارزش حال خالص صفر شود به شرطی که عدد تعداد سال ( $n$ ) مجهول باشد، آنگاه دوره بازگشت سرمایه با برآورد میزان  $n$  به‌دست‌آمده خواهد آمد (رابطه 6).

$$NPV = 0 \quad (6)$$

$$PV_B = PV_C = 0$$

#### 2-3-4-محاسبه قیمت تمام شده

برای محاسبه قیمت تمام‌شده ابتدا بایستی هزینه‌های ثابت، به اقساط یکنواخت سالانه تبدیل شود. محاسبه تبدیل هزینه‌های ثابت (هزینه‌های خرید و تهیه یا هزینه سرمایه‌ای) به اقساط یکنواخت سالانه، از طریق فرمول‌های رابطه (7) انجام می‌شود.

**جدول 4** ویژگیهای فنی مورد نیاز فاضلاب ورودی جهت برای برآورد میزان لجن حاصل از فاضلاب

واحد	مقدار	شرح	شرح
m <sup>3</sup> /d	**80000	دبی فاضلاب ورودی (Q)	influent flowrate
g VSS/g COD used	*0.4	زیست توده ایجادی (Y)	biomass yield
g bsCOD/m	*192	غلظت سوبسترای محلول ورودی - ρS	influent soluble substrate concentration (bsCOD)
g bsCOD/m <sup>3</sup>	***0.563380	غلظت سوبسترای محلول در پساب (S)	effluent soluble substrate concentration (bsCOD)
g VSS/g VSS-d	*0.1	ضریب سرعت خودخوری - k <sub>d</sub>	endogenous decay coefficient
d	*6	زمان ماند مواد ته نشین شده (SRT)	Sedimentation Retention Time
g VSS/g VSS	*0.15	کسری از زیست توده که به عنوان بقایای سلولی باقی می ماند f <sub>d</sub>	fraction of biomass that remains as cell debris
g nbVSS/m <sup>3</sup>	*30	غلظت nbVSS در پساب - X <sub>0,i</sub>	nbVSS concentration in influent
[g VSS/m <sup>3</sup> ] or [mg/l]	*220	مواد جامد معلق فرآر - ρVSS	influent Volatile Suspended Solids
[g TSS/m <sup>3</sup> ] or [mg/l]	*300	کل مواد جامد معلق ورودی - ρTSS	influent Total Suspended Solids
g/m <sup>3</sup>	*10.065	مواد غیرعالی بی اثر در کل مواد جامد معلق - iTSS	inert inorganics Total Suspended Solids
g COD/m <sup>3</sup>	*10	ضریب نصف غلظت بستر محلول - k <sub>s</sub>	half-velocity constant
	**2500	X <sub>T</sub>	
	**0.197	τ	
g COD/g-d	*12.5	حداکثر نرخ استفاده از بستر محلول - k	maximum rate of soluble substrate utilization

ماخذ: یافته های تحقیق (میانگینهای ذکر شده در کتاب مرجع و \*\* اعداد وارد شده توسط کاربر و \*\*\* اعداد برآورد شده یا همان خروجی اکسل)

**جدول 5** ویژگیهای فنی مورد نیاز برای آورد حجم لجن تغلیظ شده تولیدی

واحد	مقدار	نام	شرح
m <sup>3</sup> /d	***183	L	متوسط دبی لجن تغلیظ شده (مترمکعب در روز)
[m <sup>3</sup> /kg] or [l/g]	**0.44	f	راندمان تولید بیوگاز برحسب VSS حذف شده
%	**0.26	S	راندمان VSS حذف شده
%	**16.2	g	درصد TSS موجود در لجن خام

ماخذ: یافته های تحقیق (میانگینهای ذکر شده در کتاب مرجع و \*\* اعداد وارد شده توسط کاربر و \*\*\* اعداد برآورد شده یا همان خروجی اکسل) چگالی لجن اولیه تغلیظ نشده برابر 1000 η است

**جدول 6** خروجی برآورد میزان متان حاصل از لجن تغلیظ شده

لجن تولیدی روزانه بر حسب نوع فاضلاب ورودی (تولید جامدات دفعی روزانه) - kg TSS/d	غلظت مواد جامد (TSS) پس از تغلیظ (درصد)	حجم لجن تغلیظ شده (شامل مواد جامد و آب) kg/d	مقدار بیوگاز تولیدی (kg)	در بیوگاز (درصد)	متان موجود در بیوگاز (درصد)	متان حاصل از بیوگاز (تولیدی (kg) (مترمکعب)	متان حاصل از ژنراتور (درصد)	بازده الکتریکی (M دارد)	درصدی از برق تولیدی (کیلووات-ساعت) - یک روز kWh
***7304.1958	**0.04	***182604.89	***881.29	**0.65	***573	***873	**0.3	*1	***2402.4

ماخذ: یافته های تحقیق (میانگینهای ذکر شده در کتاب مرجع و \*\* اعداد وارد شده توسط کاربر و \*\*\* اعداد برآورد شده یا همان خروجی اکسل)

شاخصهای، نرخ بازده داخلی پروژه (IRR)، دوره بازگشت سرمایه، و ارزش حال خالص پروژه (NPV)، قابل مشاهده است.

در ادامه، جداول و خروجی های اکسل، با یک نمونه انجام شده، آورده می شود. با توجه به اینکه فرض بر آن است، اجرای پروژه، در تصفیه خانه های کنونی آبفا مشهد، و با تاسیس هاضم بی هوازی شروع گردد، لذا قیمت زمین پروژه می تواند صفر لحاظ گردد، از سوی دیگر هزینه هایی مانند ایجاد تاسیسات، هزینه های اداری و خدماتی نیز می تواند در نظر گرفته نشود چون از امکانات موجود استفاده می گردد (هر چند امکان تغییر این آیتم ها و وارد کردن هر نوع هزینه ای در اکسل فراهم شده است)، در ذیل، ابتدا جداول مربوط به هزینه های ثابت (تهیه و خرید) و هزینه های متغیر (اجرا و بهره برداری) به تفکیک، برای اجرای چنین طرحی آورده شده است که این هزینه ها همانگونه که بیان شد، به صورت "نمونه" است و کاربر می تواند هر کدام از این هزینه ها را با توجه به شرایط مورد نظر خود، تغییر دهد. با توجه به دسته های ارائه شده در قبل برای این هزینه ها به صورت نمونه در جدول ذیل ارائه می شود.

### 3-2- برآوردهای مالی احداث پروژه تولید برق حاصل از بیوگاز

مهمترین هزینه سرمایه گذاری، شامل احداث هاضمها و همچنین خرید سیستم CHP می باشد. هزینه احداث هاضمها متناسب حجم آنها بوده که خود متناسب با مقدار لجن تولیدی روزانه و مدت زمان ماند لجن در هاضمهای بی هوازی میباشد. هزینه خرید سیستم CHP نیز متناسب با حجم بیوگاز و با به عبارتی دقیقتر متناسب با مقدار متان تولیدی در روز میباشد.

در مورد هزینه ها، کاربر باید «مجموع هزینه های ثابت یا همان هزینه تهیه و خرید»، (شامل خرید یا اجاره زمین، محوطه و ساختمان سازی، تجهیزات و ماشین آلات، تاسیسات و انشعابات، هزینه لوازم اداری و خدمات، هزینه های قبل از بهره برداری)، و مجموع «هزینه های متغیر یا همان هزینه های اجرا و بهره برداری» (شامل نیروی انسانی، مواد اولیه، انرژی، نگهداری و تعمیرات، استهلاک، هزینه اداری و بیمه) را برای یک سال محاسبه و وارد نماید، همچنین کاربر می تواند نرخ تورم و نرخ تنزیل مورد نظر خود را وارد نموده و در نهایت در خروجی، نتیجه وضعیت اقتصادی پروژه به کمک

جدول 7 جمع هزینه های ثابت اجرای پروژه

ردیف	هزینه های ثابت	مبلغ (هزارریال)	هزینه های متغیر (سالانه)	مبلغ (هزارریال)
1	زمین	100,000,000	خرید مواد اولیه (لجن)	6,665,079
2	محوطه سازی	1,540,000	نیروی انسانی	2,456,471
3	ساختمان سازی	0	هزینه آب، برق و گاز	235,500
4	تاسیسات و انشعابات	0	نگهداری و تعمیرات	13,156,892
5	هزینه لوازم اداری و خدمات	0	استهلاک	7,918,775
6	تجهیزات و ماشین آلات	261,905,844	هزینه اداری و بیمه	58,288
7	هزینه های قبل از بهره برداری	800,000	جمع کل	30,491,005
	جمع	364,245,844	-	-

ماخذ: یافته های تحقیق

جدول 8 خروجی برآوردهای مالی در احداث پروژه تولید برق از بیوگاز

میزان مصرف برق در شرایط موجود در منابع و مراجع علمی-جهت مقایسه (کیلووات ساعت برای هر مترمکعب)*			دوره بازگشت	دوره بازگشت	نرخ تنزیل	نرخ تورم
میزان برق مصرفی برای تصفیه هر مترمکعب	میزان برق مصرفی برای تصفیه هر مترمکعب لجن-هوازی	میزان برق مصرفی برای تصفیه هر مترمکعب لجن-بی هوازی	دوره ای که ارزش حال خاص (NPV) مثبت میشود- ساعت	سرمایه پویا (DPBP) (با لحاظ نرخ تنزیل) - سال	دوره بازگشت سرمایه (BPB) (بدون لحاظ نرخ تنزیل) - سال	سالانه (درصد) یا بهره بانکی
***0.43	***1.02	***2.0-0.5	***36317.746	***15	***0.048	***0.23

ماخذ: یافته های تحقیق (\* میانگینهای ذکر شده در کتاب مرجع و \*\* اعداد وارد شده توسط کاربر و \*\*\* اعداد برآورد شده یا همان خروجی اکسل)

میان باری و پرباری، متفاوت است، نیاز است که میزان تولید برق، برای «یک ساعت» مشخص شود، لذا با تقسیم این عدد بر 24، میزان تولید برق در یک ساعت برابر 100.1 کیلووات به دست آمد و این عدد مبنای محاسبات جدول درآمد سالانه قرار گرفت (با فرض اینکه میزان تولید برق در ایام گرم و سرد و ساعات مختلف، یکسان باشد). لازم به ذکر است که کاربر می تواند نرخ های تعرفه خرید برق تجدیدپذیر را نیز تغییر داده و عدد همان سال مورد نظر را

درآمد حاصل از «استحصال انرژی از بیوگاز» به صورت جدول 8 می باشد. همانگونه که بیان شد به طور نمونه مشخصات فاضلاب ورودی و لجن تغلیظ شده برای یک تصفیه خانه مشهد (با روش تصفیه IMLE)، وارد اکسل شده و محاسبات بیانگر آن است که میزان برق تولیدی، 2402 کیلووات ساعت در یک روز می باشد، از آنجا که تعرفه فروش برق تجدیدپذیر، در ساعات کم باری،

وارد نماید. در جدول ذیل، ستون درآمد سالانه، حاصل ضرب سه آیتم شامل «کل ساعات در یکسال، میزان تولید برق در یکساعت و تعرفه خرید تضمینی انرژی تجدیدپذیر» می‌باشد.

**جدول 10** درآمدهای سالانه حاصل از فروش برق و فروش لجن باقیمانده برای تولید کود (هزار ریال)

شرح	تعداد ساعت ها در یک سال			میزان تولید برق در یک ساعت- کیلووات	تعرفه خرید تضمینی انرژی تجدیدپذیر (هزارریال)	درآمد سالانه (هزارریال)
	ساعت-در شبانه روز	تعداد روزها در یکسال	کل ساعات در یک سال			
ساعات کم باری (ایام گرم)	8	93	744	100.1	17.14	1,276,491
ساعات پر باری (ایام گرم)	8	93	744	100.1	68.57	5,106,710
ساعات میان باری (ایام گرم)	8	93	744	100.1	34.29	2,553,727
ساعات کم باری (ایام سرد)	8	272	2176	100.1	12.45	2,711,829
ساعات پر باری (ایام سرد)	8	272	2176	100.1	12.45	2,711,829
ساعات میان باری (ایام سرد)	8	272	2176	100.1	12.45	2,711,829
درآمد حاصل از فروش برق	-	-	-	-	-	17,072,415
درآمد حاصل از فروش لجن باقیمانده	-	-	-	-	-	2,920,000
درآمد حاصل از گرنت زیست محیطی	-	-	-	-	-	0
درآمد کل سالانه	-	-	-	-	-	19,992,415

ماخذ: سازمان انرژی های تجدید پذیر (ساتبا)، صورتجلسه ۳۸۰ هیات تنظیم بازار برق 1402 و یافته های تحقیق

مقایسه با متوسط نرخ خرید برق تجدیدپذیر در سال 1402 که برابر 21800 ریال است، در شرایط موجود، پروژه دارای توجیه اقتصادی نبوده و نمی‌تواند مد نظر قرار گیرد. لازم به ذکر است از آنجا که اکسل‌هایی تهیه شده "کارپروست" بوده و حالت نرم‌افزای را داراست، امکان تهیه یک اپلیکشن و یا نرم افزار منطبق با آنها امکان پذیر است که برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود که تهیه این نرم افزار مد نظر قرار گیرد، همچنین در این اکسل، «معکوس عملیات اقتصادی» نیز تعبیه شده است یعنی آنکه کاربر می‌تواند با وارد کردن، سال مدنظر سرمایه‌گذار برای «بازگشت سرمایه» و نیز «نرخ بازده داخلی IRR» مد نظر سرمایه‌گذار، مشاهده نماید که دولت بایستی با چه نرخ، به طور متوسط، برق را خریداری نماید که سرمایه‌گذار حاضر به سرمایه‌گذاری در این پروژه، با توجه به «سال و نرخ بازده مد نظر خود» باشد. همانگونه که بیان شد، در این اکسل، امکان تغییر شرایط تولید برق، برای کاربر فراهم شده است، لذا متناسب با محل و مشخصات مورد استفاده برای هر کدام از این روشها، و همچنین تغییر نرخ‌های خرید برق، ممکن است توجیه پذیری اقتصادی، تغییر نماید.

#### 5-پیشنهادات

در این تحقیق برآورد متان حاصل از تصفیه لجن، مد نظر قرار گرفت که با توجه به شرایط موجود در نمونه مورد بررسی، این امر انتخاب گردید. برای مطالعات آینده بررسی متان حاصل از تصفیه فاضلاب (ورود فاضلاب به هاضمهای بیهوازی) پیشنهاد می‌گردد.

از آنجا که مهمترین گاز برای تولید برق، گاز متان می‌باشد، راهکارهای افزایش متان، در مراجع علمی، به صورت «افزایش نسبت کربن به نیتروژن با تغییر در پارامترهای راهبری تصفیه خانه فاضلاب، جلوگیری از نوسان دما و وارد شدن شوک دمایی به هاضمها (با استفاده از سیستم برق اضطراری و استفاده از المنتهای حرارتی باکیفیت بالا)، بررسی غلظت‌های مختلف لجن ورودی به هاضم به منظور پیدا کردن بهینه‌ترین مقدار عنوان شده است [20] که در این تحقیق نیز پیشنهاد می‌گردد.

با توجه به آنچه در بالا بیان شد، می‌توان محاسبات جریان نقدی، جریان جمعی درآمد، شاخصهای IRR و NPV و دوره بازگشت سرمایه را به دست آورد. جدول 9، اقتصادی نبودن پروژه در شرایط کنونی را نشان میدهد، اما لازم به ذکر است که این مقادیر با توجه به شرایط استحصال بیوگاز و متان لجن در حال حاضر است که ایجاد تغییراتی که بتواند درصد متان را بهبود دهد، و یا آنکه فرآیند تصفیه فاضلاب از ابتدا بر روی حالت بی‌هوازی قرار گیرد، بر روی انرژی استحصالی اثر گذاشته و لذا درآمد را تحت تاثیر قرار داده و به تبع، بر میزان دوره بازگشت سرمایه و IRR اثر خواهد داشت (امکان ایجاد این تغییرات در فایل اکسل آورده شده است).

#### 4-جمع بندی

روش تولید انرژی تجدیدپذیر از بیوگاز فاضلاب، در شرکت آبفای مشهد به طور نمونه، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت و امکانسجی فنی و اقتصادی آن، ارائه گردید. در این رابطه اکسلی متناسب با انجام این روش تهیه که کاربر دوست (user-friendly) بوده و در این اکسل، کاربر می‌تواند با وارد کردن شاخصها و فاکتورهای مهم از نظر فنی و اقتصادی (به عنوان مثال وارد کردن مشخصات بیوگاز و برآورد مقدار لجن تولیدی توسط اکسل)، میزان برق تولیدی را (برحسب فرمولها مندرج در منابع علمی)، در خروجی را مشاهده نماید و همچنین با توجه به هزینه‌های ثابت و متغیر که کاربر وارد می‌نماید، در خروجی اکسل، شاخصهایی مانند نرخ بازده داخلی پروژه، دوره بازگشت سرمایه را مشاهده نموده و به کمک آن بتواند سرمایه‌گذار (یا تصمیم گیرنده) در مورد انجام و یا عدم انجام پروژه، در زمانهای مختلف و با قیمتها و ویژگیهای مختلف، تصمیم‌گیری کند. نتایج نمونه وارد شده، با مفروضاتی، از قبیل نرخ تورم 30٪ و نرخ تنزیل 23٪، هزینه‌های ثابت و متغیر سالانه‌ای برابر 364,245 و 30,491 میلیون ریال، منجر به تولید روزانه برابر 2402 کیلووات ساعت گردید که درآمد سالانه‌ای برابر 19,992 میلیون ریال را رقم می‌زند. قیمت تمام شده برق به این روش، برابر 36318 ریال برای هر کیلووات بوده که در

- biogas in Kashan urban wastewater treatment plant. *Journal of mechanical engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 325-331, 2016. (In Persian)
- [14] Sadeghi, Z., Mehdizadeh, S., Hari, H., Economic and environmental evaluation of energy production from sewage in Kerman. *Journal: Research of Agricultural Economy*, Vol. 8, No. 2, pp. 113-131, 2015. (In Persian)
- [15] Faridizad, Gh.; Abdulzadeh Sh., Elham and Bankdarpour, B., High rate activated sludge process: new insights for energy recovery from urban wastewater. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, Vol. 19, No. 113, pp. 28-46, 2019. (In Persian)
- [16] Gilani, H., and Sahibi, H., Sewage sludge supply chain with water and energy interrelationship under disturbance conditions: A stable scenario-based model. *Journal: Supply Chain Management*, Vol. 23, No. 72, pp. 55-70, 2023. (In Persian)
- [17] Badlians Gh., Gakig and Kashi Tarash Isfahani, Z., Investigation and evaluation of sewage sludge as a source of living biomass for energy production. *The first national conference on environmental protection and planning*, 2013. (In Persian)
- [18] Porzaki, A., *Investigation Of The Possibility Of Energy Extraction In The Sewage Network*, research project, consultant: Sepehr Arian Negin Pjohan Innovation Company, employer: Mashhad Water and Wastewater Company, 2023. (In Persian)
- [19] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment And Reuse*: McGraw-Hill, pp. 80-90, 2003.
- [20] Chahartaghi, M., *Technical and economic feasibility of changing sludge aerobic system to anaerobic system in Khin Arab and Altimur treatment plants*, Shahrood University of Technology, pp. 9-13, 2018. (In Persian)
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Guidelines for National Greenhouse Gas*, pp. 1-20, 2006.
- [22] Skoonjad M. M., *Engineering Economics, Economic Evaluation of Industrial Projects*, Amirkabir University of Technology Publications, pp. 8-60, 2013. (In Persian)
- [23] A C. Shen, *Pilot-scale Study on Anaerobic Digestion Applied to a Saline Industrial Waste Activated Sludge*, pp. 18-40, 2008.
- قیمت تمام شده یک کیلووات ساعت برق، در شرایط موجود در این گزارش (در سال 1402)، و برای نمونه‌های وارد شده، برابر 36318 ریال، به دست آمد. افزایش قیمت خرید برق تجدیدپذیر توسط دولت، جهت اقتصادی شدن چنین پروژه‌هایی که به حفظ محیط زیست و تولید انرژی تجدیدپذیر منجر می‌گردد، پیشنهاد می‌شود. به ویژه آنکه نهادهای عمومی و دولتی از قبیل شرکت آبفا دارای موضوع تکلیفی بهره‌گیری از 20٪ از سهم انرژی‌های تجدید-پذیر توسط آن شرکت یا نهاد، را نیز دارا می‌باشند، لذا توجه به این موضوع باید توسط مدیران این مجموعه‌ها مد نظر باشد.

## تشکر و قدردانی

مقاله حاضر برگرفته از طرح پژوهشی، طی قراردادی بین شرکت آبفا مشهد و جهادانشگاهی خراسان رضوی می‌باشد که بدین وسیله از کارکنان محترم آن شرکت قدردانی می‌گردد.

## منابع

- [1] Pokhrel, S., Amiri, L., Poncet, S., Sasmito, A. P., & Ghoreishi-Madiseh, S. A., Renewable heating solutions for buildings; a techno-economic comparative study of sewage heat recovery and Solar Borehole Thermal Energy Storage System, *Energy and Buildings*, Vol. 259, Article 111892, 2022.
- [2] Eurostat, *Percentage population connected to the sewage system*, www.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00020/default/table?lang=en. Accessed, 2022.
- [3] Farouk, H., Lang, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. G., Sewage wastewater: A potential energy source for boosting power generation in the Khartoum state of Sudan, *Energy Reports*, Vol 8, pp. 384-389, 2022.
- [4] MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), *Water and waste water*, 2020.
- [5] Israel Bernardo S. Poblete Ofélia de Queiroz F. Araújo José Luiz de Medeiros, Sewage-water treatment with bio-energy production and carbon capture and storage, *Chemosphere*, Vol. 286, Part 2 Article 131763, 2022.
- [6] Liu, H., Qiao, H., Liu, S., Wei, G., Zhao, H., Li, K., & Weng, F., Energy, environment and economy assessment of sewage sludge incineration technologies in China, *Energy*, Vol. 264, Article 126294, 2022.
- [7] Wang, K., & Nakakubo, T, Strategy for introducing sewage sludge energy utilization systems at sewage treatment plants in large cities in Japan: A comparative assessment, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 316, Article 128282, 2021.
- [8] arotenu, A., Di Fraia, S., Massarotti, N., Sobek, S., Uddin, M. R., Vanoli, L., & Werle, S., Predictive modeling for energy recovery from sewage sludge gasification, *Energy*, Vol. 263, Part B, Article 125838, 2022.
- [9] Hameledar, M., Yousefi, H., Nooralhi, Y., and Fahimi H., R., Taking advantage of the potentials of the water and sewage industry for distributed production. *clean energy, Journal of Ecohydrology*; Vol. 5, No. 4, pp. 1147-1160, 2017. (In Persian)
- [10] Ghanbari, R., Rezazadeh, S., Dadovand, A., and Kamrani, M., Investigating the necessity of using renewable energy with the approach of measuring the potential of energy extraction from urban sewage biomass. *Conference of power plants of the country Hormozgan*, 2013. (In Persian)
- [11] Yavari, Z., Shi'i, H.; Nadafi, K.; Izanlou, H.; Khazaei, M., and Mahmoudian, M. H., Investigating the production of electricity from synthetic wastewater treatment in microbial fuel cells. *Journal of Qom University of Medical Sciences*; Vol. 6, No. 4, pp. 96-103, 2011. (In Persian)
- [12] Mozhari, E.; Mozafari, M., H., and Esfandiari, R., Use of sewage treatment plant sludge in electricity production. *Scientific-expert quarterly journal of renewable and new energies*; No. 2, pp. 45-49, 2013. (In Persian)
- [13] Salmani, F., Amiri-Rad, E., and Salimi, M., Feasibility of building two units of simultaneous production of heat and electricity with