# ارزیابی معادل انرژی ویناس در ایران

**هانیه صمدی[۱]، برات قبادیان[۲]، محسن نصرتی[۳]**

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس؛ Hhaniyehhsmd@gmail.com
[۲]استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس؛ Ghobadib@modares.ac.ir
[۳]دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس؛ Mnosrati20@modares.ac.ir

## چکیده

بحران انرژی به سرعت در جهان به دلیل محدودیت منابع نفتی و رشد جمعیت در حال گسترش است. به همین علت اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر جهت مقابله با گرمایش جهانی زمین و ارائه‌ی راه‌کار برای حفظ محیط زیست، روز به روز نمایان‌تر می‌شود. زیست‌توده یا بیوماس یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که توسط مواد آلی حاصل از گیاهان، درختان و محصولات کشاورزی تولید می‌شود. در این بین، با اعمال فرآیند هضم بی‌هوازی بر روی پسماندهای آلی، گازی با خلوص متان ۷۵-۵۰ درصد و دی‌اکسیدکربن ۵۰-۲۵ درصد تولید می‌شود. در بین پسماندهای آلی، ویناس، پساب فرآیند تقطیر اتانول حاصل از ملاس نیشکر، دارای پتانسیل و ارزش حرارتی بسیار بالا برای تولید بیوگاز می‌باشد. pH این محصول کم بوده و دارای مواد معدنی و آلی غنی با بوی بسیار بد می‌باشد. با توجه به گستره‌ی سطح زیر کشت نیشکر و اهمیت تولید اتانول از ملاس آن، مهار و دفع محصول جانبی آن بسیار حائز اهمیت است. به‌همین منظور و در راستای هدف تولید متان و هیدروژن از ویناس، در این پژوهش به ارزیابی معادل انرژی ویناس به عنوان خوراک اولیه برای هاضم‌های بی‌هوازی تولید بیوگاز پرداخته شد. نتایج نشان داد با توجه به حجم ویناس تولیدی در ایران، ۱۲/۵ مگاوات توان الکتریکی به ارزش ۴۳۰ میلیارد ریال، تولید سالانه‌ی ۴۳ میلیون مترمکعب گاز متان و تولید روزانه‌ی ۴۰۰۰ مترمکعب گاز هیدروژن، حاصل می‌شود.

**واژگان کلیدی:** اتانول، بیوگاز، متان، ویناس، هضم بی‌هوازی

# Evaluation of Vinasse Equivalent Energy in Iran

Haniyeh Samadi[a], Barat Ghobadian[*b], Mohsen Nosrati[c]

[a]MSc student of Biosystem Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Hhaniyehhsmd@gmail.com.
[b]Professor of Biosystem Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Ghobadib@modares.ac.ir
[c]Professor of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Mnosrati20@modares.ac.ir

## *ABSTRACT*

The energy crisis because of oil resources limitation and population growth is rapidly expanding in the world so the importance of using renewable energies to cope with global warming and providing a sustainable solution of protecting the environment is becoming more and more evident. Biomass is one of the most important renewable energy sources which is produce by organic matters derived from plants, trees and crops. Meanwhile, by applying the anaerobic digestion process to organic wastes, a gas with a purity of 50-75% methane and 25-50% of carbon dioxide will be generated. Among organic wastes, vinasse, the stillage of distillation process of ethanol production from sugarcane molasses, has a very high potential and thermal value for biogas production. This product has low pH and a bad odor which is rich in minerals and organic compounds and easy degradable. Due to cultivation area of sugarcane in Iran and the importance of ethanol production from its molasses, it is so serious to control and dispose its byproduct. For this purpose, in order to produce methane and hydrogen from vinasse, this study was carried out to evaluate the equivalent energy of vinasse as the primary feed for anaerobic digestion for biogas production. The results showed that according to produced vinasse amount in Iran, 12.5 MW of electrical power, equal to 430 billion Rials, annually, 43,000,000 m3 methane and 1,460,000 m3 hydrogen are generated.

**Keywords:** Anaerobic Digestion, Biogas, Ethanol, Methane, Vinasse.

۱- نویسنده مسئول: دکتر برات قبادیان، دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، ۰۲۱۴۸۲۹۴۳۱۰، ایمیل: Ghobadib@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

سوخت‌های فسیلی، بقایای گیاهان و حیوانات ماقبل تاریخ هستند که از صدها میلیون سال پیش شروع به شکل‌گیری کرده و به‌صورت مایع یا گاز یافت می‌شوند. سالیان سال از این سوخت‌ها برای تأمین انرژی مورد نیاز جوامع استفاده شده است. منابع سوخت‌های فسیلی علاوه بر دارا بودن مزایایی مانند انرژی گرمایی بالا، سادگی بهره‌برداری، انتقال و حمل آسان، فرآوری آسان و ...، دارای معایبی نیز مثل تجدیدناپذیر بودن این منابع، انتشار گازهای گلخانه‌ای، ایجاد باران اسیدی به دلیل انتشار مونواکسیدکربن و دی‌اکسید گوگرد، خطرناک بودن حمل و نقل، ایجاد گرمایش جهانی و ... می‌باشند. با در نظرگرفتن موارد ذکر شده، جوامع و دولت‌ها باید در مسیر بهره‌برداری هرچه سریع‌تر و مفیدتر از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌منظور تولید انرژی مورد نیاز زندگی انسان‌ها قدم بردارند (Herzog et al., 2001).

### ۱-۱- انرژی‌های تجدیدپذیر

به انواعی از انرژی می‌گویند که منبع تولید آنها، بر خلاف انرژی‌های تجدیدناپذیر (فسیلی)، قابلیت آن را دارد که توسط طبیعت در یک بازه‌ی زمانی کوتاه مجدداً به وجود آمده یا به عبارتی تجدید شود. انرژی نهایی تولید شده توسط این منابع بیشتر مبتنی بر جریان انرژی تولید شده توسط حرکت و گرانش سیاره‌ها (مانند انرژی جزر و مد)، حرارت ذخیره شده و آزاد شده توسط زمین (مانند انرژی زمین گرمایی) و به‌ویژه انرژی تابیده شده توسط خورشید (مانند انرژی خورشیدی) می‌باشد. از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان انرژی‌های خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، آب و زیست‌توده را نام برد. منابع انرژی قابل تجدید، در حال حاضر در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از کل تقاضای انرژی جهان را تامین می‌کنند. در اکثر کشورها به‌خصوص کشورهای در حال توسعه، نیازهای انرژی بیشتر با منابع انرژی بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. مطالعات و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در نیمه‌ی دوم قرن ۲۱، میزان سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از تأمین انرژی مورد نیاز جوامع تا ۵۰ درصد خواهد رسید (Herzog et al., 2001; Martin et al., 2007). با توجه به اینکه پژوهش حاضر در مورد انرژی حاصل از زیست‌توده می‌باشد، به‌همین منظور به بررسی این نوع از منابع تجدیدپذیر می‌پردازیم.

### ۱-۲- انرژی زیست‌توده

زیست‌توده یا بیوماس اصطلاحی است که برای همه‌ی مواد آلی تولید شده از گیاهان، درختان و محصولاتی است که انرژی خورشیدی را از طریق فتوسنتز جذب می‌کنند. انرژی زیست‌توده یا انرژی زیستی، تبدیل زیست‌توده به اشکال مفید انرژی مانند گرما، برق و سوخت مایع می‌باشد. زیست‌توده برای تولید انرژی زیستی، مستقیما از طریق محصولات اختصاصی تولید انرژی یا باقی‌مانده‌ی حاصل از فرآیند فرآوری محصولات در صنایع غذایی و یا محصولات دیگر مانند خمیر کاغذ و کاغذ حاصل از صنعت چوب، به‌دست می‌آید. تبدیل بیوماس به انرژی زیستی، می‌تواند به‌عنوان مدیریت جریان مواد تولیدی توسط خورشید، مواد غذایی و فیبر در جامعه‌ی ما در نظر گرفته شود. در حال حاضر، ضایعات جنگل و چوب، کشاورزی و زباله‌ها به عنوان بهترین ماده‌ی اولیه جهت تولید برق و حرارت هستند. همچنین پسماند صنایع شکر، غلات و روغن‌های گیاهی برای تولید سوخت‌های زیستی مایع به‌کار می‌روند (Chum & Overend, 2001; Herzog et al., 2001; Martin et al., 2007). امروزه بیوماس حدود ۱۰ درصد از نیاز جهان به انرژی را تأمین می‌کند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تولید انرژی از بیوماس، از سال ۲۰۱۰ میلادی، از مقدار ۱۳۱۳ میلیون تن تا ۳۲۷۱ میلیون تن معادل انرژی نفت تا سال ۲۰۴۰ میلادی افزایش خواهد یافت (Manzano-Agugliaro et al., 2013).

### ۱-۳- بیوگاز

هنگامی که مواد آلی مانند مواد غذایی، بقایای گیاهی، کود حیوانی، لجن فاضلاب، فاضلاب شهری و ... در نبود اکسیژن آزاد تجزیه شوند، در طی این فرآیند به‌طور معمول گازی تولید می‌شود که شامل ۴۰ تا ۷۰ درصد متان و بقیه بیشتر دی‌اکسیدکربن با اثرات گازهای دیگر است. تعریف دیگر از بیوگاز این می‌باشد که هرگونه مخلوط دی‌اکسیدکربن و متان (در کنار اثرات گازهای دیگر) قابل احتراق که توسط هضم بی‌هوازی مواد آلی در غیاب اکسیژن آزاد، تولید می‌شود (Abbasi et al, 2011). بیوگاز ارزش کالری خوبی داشته و می‌تواند به‌طور مستقیم به‌عنوان سوخت و یا به‌طور غیرمستقیم به‌عنوان برق مورد استفاده قرار گیرد. بیوگاز یک منبع انرژی در دسترس می‌باشد به‌طوری‌که ارزش انرژی آن بالا بوده و قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حاصل از آن آسان می‌باشد. بنابراین می‌توان از آن، مستقل از عوامل تأثیرگذار مانند موقعیت جغرافیایی و فصل استفاده کرد (Wilfert & Schattauer, 2004; Mengistu et al., 2015).

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

### ۴-۱- هضم بی‌هوازی

هضم بی‌هوازی یک تکنولوژی بیوشیمیایی برای تیمار پسماندهای آلی و تولید بیوگاز است. پتانسیل استفاده از ماده‌ی هضم‌شده به عنوان کود می‌تواند وابستگی به کودهای شیمیایی و معدنی که نیاز شدید به مصرف انرژی دارند را با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش دهد (Mshandete et al., 2004). این فرآیند شامل چهار مرحله‌ی هیدرولیز، اسیدزایی یا تخمیر، استات‌زایی و متان‌زایی می‌باشد (Herzog et al., 2001) که در شکل (۱)، نشان داده شده‌اند.

### ۵-۱- ویناس

از فرآورده‌های جانبی مهم نیشکر، باگاس و ملاس می‌باشند. با ارزش‌ترین محصولی که از ملاس نیشکر به‌دست می‌آید، اتانول است که در بخش صنعت و پزشکی یکی از پرکاربردترین مواد می‌باشد. طی فرآیند تقطیر اتانول، یک ماده‌ی جانبی زیست تخریب‌پذیر به نام ویناس تولید می‌شود. ویناس دارای pH اسیدی ۴-۳، نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD)، به‌مقدار mg/L ۵۰۰۰۰ -۳۵۰۰۰ و نیاز شیمیایی اکسیژن (COD) به‌مقدار mg/L ۱۵۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰ می‌باشد. ۸۰ درصد ویناس، متشکل از مواد آلی تجزیه‌پذیر بوده و دارای خاصیت قلیایی کم و تجمع اسیدهای آلی زیاد می‌باشد که منجر به pH نامطلوب برای متان‌زایی می‌شود. برای خنثی‌سازی خاصیت اسیدیته، بایستی ترکیبات قلیایی افزوده شود. ویناس تولیدی از تقطیر اتانول برخلاف دارا بودن پتانسیل بالای تولید انرژی، دارای بوی بد و خاصیت زیست تخریب‌پذیری بسیار نیز می‌باشد. تاکنون راه‌کارهای گوناگونی برای مهار یا دفع زیست تخریب‌پذیری ویناس ارائه و عملیاتی شده‌اند. استفاده از بعضی راه‌حل‌های پیشرفته در بکارگیری ویناس مشتق شده از نیشکر ممکن است منابع بیشتر انرژی، تأمین خوراک حیوانات و کاهش مصرف آب را منجر شود (Janke et al., 2016; Moraes et al., 2015) که در ادامه به چندین مورد اشاره می‌شود.

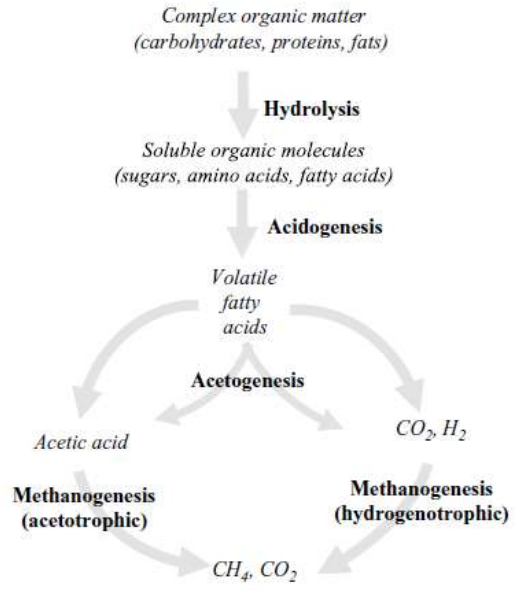


Figure 1. Anaerobic Digestion process steps.
شکل ۱- مراحل فرآیند هضم بی‌هوازی.

استفاده از ویناس در عملیات کشاورزی کشتزارها از دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد و تا دهه ۱۹۸۰، این عمل به طور معمول جهت مصرف مایع پسماند به عنوان کود برای مزارع نیشکر ادامه داشت (Walter et al., 2011). با این وجود، کاربرد مستقیم ویناس در خاک می‌تواند باعث شوری خاک، اشباع فلزات موجود در خاک و انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی، تغییر در کیفیت خاک به دلیل عدم تعادل مواد مغذی و به‌طورکلی کاهش قلیائیت منگنز، زیان‌های زراعی و افزایش تلفات محصول، تغییر pH خاک و انتشار بوی گوگرد شود. در کل استفاده از ویناس خام با هدف کوددهی به مزارع، به عنوان ارائه‌ی یک راه‌حل برای دفع آن، می‌تواند یک عمل اشتباه باشد (Christofoletti et al., 2013).

ویناس معمولا دارای رطوبت حدود ۹۳ درصد است که مواد جامد و مواد معدنی مانند پتاسیم، کلسیم و منیزیم موجود در آن ممکن است یک محیط کشت غنی برای فعالیت‌های بیولوژیکی باشد (Christofoletti et al., 2013; Reis et al., 2014). استفاده از میکروارگانیسم‌ها برای دفع ویناس، تنها برای کاهش COD و ترکیبات سمی به کار گرفته نمی‌شود، بلکه استفاده از قارچ‌های موجود در ویناس می‌تواند باعث افزایش بازده

کارخانه‌های اتانول بر پایه‌ی نیشکر، با هدف تولید خوراک و مکمل‌های غذایی برای دام باشد (Reis et al., 2014).

روش دیگر برای مهار ویناس، روش تغلیظ به کمک تبخیر می‌باشد که در طی این فرآیند، آب از ویناس (بدون از دست‌دادن جامدات) حذف شده و درنتیجه حجم آن کاهش یافته و می‌تواند هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهد و همچنین گستره‌ی کاربرد ویناس را به‌خصوص زمانی که به‌صورت خام به‌عنوان کود استفاده می‌شود، افزایش دهد. با این حال، این فرآیند چون سریع رخ می‌دهد، کریستالی‌شدن خود به خود جامدات باعث افزایش غلظت‌شان می‌شود که این اتفاق می‌تواند به‌عنوان مشکل این راه‌کار بیان شود (Rodrigues Reis & Hu, 2017).

یک تکنولوژی دیگر برای کاهش مقدار پسماند ویناس، تولید مخمر است. در این حالت، دو عامل باعث افزایش هزینه‌های این راه‌کار می‌شوند. الف) لزوم اضافه‌کردن نمک‌های آمونیوم و منیزیم به ویناس، ب) مصرف انرژی بالا برای تبخیر آب از ویناس که در این فرآیند نیاز است (Kannan & Upreti, 2008).

با درنظر گرفتن مطالب ذکر شده و همچنین محتوای مواد آلی موجود در ویناس، می‌توان از آن به‌عنوان خوراک اولیه‌ی فرآیند هضم بی‌هوازی جهت دست‌یابی به گاز متان استفاده نمود. همچنین ماده‌ی خروجی این فرآیند به‌دلیل کاهش مواد سمی، و از بین رفتن برخی عناصر مضر خاک، می‌تواند به‌عنوان کود غنی برای مزارع کشاورزی به‌کار برده شود.

امکان تولید $H_2$ و $CH_4$ در تخمیر دو مرحله‌ای ویناس تکیلا در راکتورهای SBR (Sequencing Batch Reactor) و UASB (Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket) ارزیابی شد. غلظت‌های مختلف ویناس از ۵۰۰ COD/L mg تا ۱۶ g COD/L در راکتور SBR با پیش‌تیمار حرارتی برای تولید هیدروژن به‌کار گرفته شدند. مقدار بیشینه‌ی حجمی تولید $H_2$، ۵۷/۴ ml $H_2$/L h، تولید مخصوص $H_2$، ۹۱۸ mL $H_2$/g VSS d با غلظت ۱۶ g COD/L و زمان ماند هیدرولیکی (HRT)، ۶ ساعت بود. پساب حاصل از تخمیر، برای تولید $CH_4$ در راکتور UASB هضم شد. درصد ترکیب متان در بیوگاز تولیدی ۶۸ درصد، مقدار بیشینه‌ی حجمی تولید متان ۱۱/۷ mL $CH_4$/L h، نرخ تولید مخصوص متان mL $CH_4$/g COD h ۷/۲ و بازدهی ۲۵۷/۹ mL $CH_4$/g COD در HRT ۲۴ ساعت و با غلظت بستر ۱۶۳۶ mgr COD/L بود. حذف مواد آلی جامد در راکتورهای SBR و UASB، ۷۳-۷۵ درصد گزارش شد (Buitron et al., 2014). استفاده از گلوکز به‌همراه ویناس به‌عنوان تنها منبع آلی فرآیند، باعث کاهش ۱/۹۶ mol $H_2$ g/COD شد و بیشینه مقدار $H_2$ در غلظت ۵ g COD/L وHRT ۱ ساعت و بیش‌ترین بازده هیدروژن mol $H_2$/g COD ۳/۰۷ بود که در غلظت ۵ g COD/L، HRT ۶ ساعت و نسبت ویناس به گلوکز ۱:۳ به‌دست آمد. تولید $H_2$ و $CH_4$ به‌منظور کاهش آلایندگی صنایع لبنی با کمک باکتری‌های آنتروباکتر و متانوژن (متان‌ساز) کود گاو با انتخاب غلظت‌های مختلف فاضلاب صنایع لبنی انجام گرفت. نتایج آزمایشات با انواع مدل‌های سینتیکی برای مشاهده‌ی مصرف سوبسترا و الگوی رشد باکتری‌ها تست شدند. نتایج حذف آلاینده‌ها مانند یک سامانه‌ی بهینه به صورت فسفات ۸۲، سولفات ۴۲ و نیترات ۶۹ درصد بود (Kothari et al., 2017). طی پژوهشی دیگر بیومتان از یک راکتور SBBR حاصل از پساب تولید هیدروژن از ویناس تولید شد. سامانه دست‌یابی به انرژی زیستی دو مرحله‌ای ۱۳/۶kJ به ازای هر گرم COD ۳۸/۸ درصد انرژی بیشتری نسبت به سامانه سنتی تک مرحله‌ای تولید نمود. در پژوهشی که در آن ارزش کالری بیوگاز مورد بررسی قرار گرفت، ۲۵-۲۲ Mj / $m^3$ کالری بیوگاز و ۳۵,۸۰۰ kj / $m^3$ کالری متان اندازه‌گیری شد که این مقدار معادل ۱۰- ۶/۲۵ kWh / $m^3$ توان الکتریکی می‌باشد (Volpini et al., 2018).

با توجه به مواجهه با بحران انرژی در سراسر دنیا و به‌خصوص ایران، لزوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزین برای سوخت‌های فسیلی به‌منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها و گرمایش جهانی زمین، ضروری می‌باشد. از این رو، بهره‌گیری از انرژی زیست توده و تولید بیوگاز از پسماند، راه‌کاری نوین در این زمینه می‌باشد. پساب حاصل از تقطیر اتانول، ویناس نامیده می‌شود که سرشار از مواد آلی بوده که به‌عنوان خوراک اولیه‌ی مستعد جهت هضم بی‌هوازی می‌باشد. این ماده علی‌رغم مزایای ذکر شده، بسیار زیست‌تخریب پذیر می‌باشد. در پژوهش حاضر، انرژی معادل ویناس، به‌منظور تولید بیوگاز در ایران بررسی خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

این بخش، به بررسی پتانسیل تولید برق و حرارت از ویناس نیشکر حاصل از تقطیر اتانول پرداخته شده است. بدین منظور داده‌های واقعی مربوط به تولید اتانول و همچنین ویناس حاصل از آن در ایران مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ادامه ظرفیت تولید بیوگاز از ویناس نیز شرح داده می‌شود.

### ۲-۱- صنعت نیشکر در ایران

ایران یکی از تولیدکننده‌های نیشکر و فرآورده‌های جانبی آن در منطقه‌ی خاورمیانه است. کشت نیشکر در ایران در حال مکانیزه و صنعتی‌شدن

می‌باشد، به‌نحوی که سطح زیر کشت آن در ۱۰ سال اخیر رشدی معادل ۱۰۰ درصد را داشته است. استان خوزستان بیش از ۹۹ درصد از کشت نیشکر کشور را دارا می‌باشد. طبق آمار سازمان کشاورزی و خواروبار سازمان ملل (FAO) در سال ۲۰۰۹ میلادی، ایران با سطح زیر کشت ۶۰،۳۷۸ هکتار رتبه ۲۴ در میان کشورهای تولیدکننده‌ی نیشکر را دارا بود. عملکرد در واحد سطح مزارع نیشکر ایران ۵۰/۲۷ تن در هکتار و میزان تولید نیشکر در این سال حدود ۳ میلیون تن بوده است (Sadeghzadeh et al., 2011). میزان تولید ضایعات و پسماند محصولات کشاورزی در ایران بسیار بالا است، که با توجه به ترکیبات آن‌ها به عنوان منابع مناسبی برای تولید اتانول در نظر گرفته می‌شوند. ملاس نیشکر ماده‌ای بسیار ارزشمند بوده که دارای مواد معدنی غنی است. بسیاری از شیرین‌کننده‌ها به دلیل اینکه تمامی خواص آن‌ها گرفته می‌شود به رنگ سفید هستند. در صورتی که ملاس نیشکر به دلیل دارا بودن خواص طبیعی و ارگانیک نیشکر، تیره رنگ می‌باشد. ملاس یکی از فراوان‌ترین و ارزان‌ترین منابع کربن در دسترس و قابل استفاده برای تولید اتانول می‌باشد، به‌طوری‌که ۳/۶ کیلوگرم ملاس توانایی تولید یک لیتر الکل را دارد. با روش تولید اتانول از ملاس علاوه بر جلوگیری از ورود آن به طبیعت، محصولی به دست می‌آید که سوختی پاک و سازگار با طبیعت می‌باشد. الکل اتیلیک که با اسم‌های دیگر مثل الکل میوه و اتانول نیز شناخته می‌شود، مایعی زلال و بی‌رنگ بوده که به هر نسبتی با آب مخلوط شده و به‌طور طبیعی بوی مشخص و تیزی دارد. در ایران، الکل اتیلیک تحت نظارت و بر اساس ضوابط و استانداردهای وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران تولید و به بازار مصرف توزیع می‌شود. الکل اتیلیک مصنوعی برای بعضی مصارف مشخص صنایع غذایی، دارویی و آرایشی-بهداشتی توصیه نمی‌گردد. الکل اتیلیک توزیع شده در بازار ایران از نوع الکل اتیلیک طبی ۹۶ درجه بوده، به‌طوری‌که الکل اتیلیک صنعتی ۹۰ درجه می‌باشد (Iran Ethanol Producers Association, 2018).

## ۲-۲- ویناس تولیدی در ایران

در مسیر تقطیر و تولید اتانول، یک پساب به نام ویناس تولید می‌شود که می‌تواند به محیط‌زیست آسیب جدی وارد کند. نیشکر پس از برداشت به کارخانه رفته و پس از آسیاب، شیره یا عصاره آن گرفته شده و تخمیر می‌شود. نتایج این‌کار، الکل اتانول و یک ماده خام به نام ویناس است که در دمای بالا و نیاز به اکسیژن شیمیایی بسیار بالایی تولید شده و دارای مواد آلی و قدرت آلایندگی بسیار بالایی می‌باشد. در بسیاری از کشورها از ویناس به طور مستقیم به عنوان کود در مزارع به خاطر وجود پتاسیم غنی استفاده می‌کنند، اما مقدار استفاده از آن توسط آژانس‌های محیط زیستی دارای محدودیت است. مشکل اصلی استفاده از ویناس به طور مستقیم، در دسترس بودن آن در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در روزهای بارانی است. علاوه بر این، خطر آلودگی آب‌های سطحی که آب شرب برخی روستاها و شهرها را تأمین می‌کنند نیز وجود دارد. ویناس بایستی قبل از تزریق شدن به خاک توسط برخی تیمارها مانند هضم بی‌هوازی تخمیر شود که باعث تولید بیوگاز و کود گیاهی خواهد شد (Granato & Silva, 2002; Santos et al., 2011).

با استناد به آمار موجود در انجمن تولیدکنندگان اتانول ایران، ظرفیت اسمی تولید اتانول در ایران، ۶۰ میلیون لیتر در سال می‌باشد. در صورتی‌که مقدار واقعی تولید الکل در کشور، به ۲۴۰ میلیون لیتر در سال می‌رسد. به طور متوسط به‌ازای تولید یک لیتر اتانول، ۱۸-۱۰ لیتر ویناس تولید می‌شود.

## ۲-۳- انرژی قابل دسترس حاصل از بیوگاز

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، پتانسیل تولید بیوگاز از ویناس به این صورت می‌باشد که به ازای هضم $m^3$ ۱ ویناس طی فرآیند بی‌هوازی، $m^3$ ۱۴/۶ بیوگاز تولید می‌شود. البته در منابع مختلف، مقادیر دیگری نیز گزارش شده است که مقدار ذکر شده (استفاده شده در این پژوهش)، میانگین این مقادیر می‌باشد (de Souza et al., 2011).

## ۲-۴- فناوری تولید گاز متان و هیدروژن با کمک فرآیند هضم بی‌هوازی ویناس نیشکر

هضم بی‌هوازی یک فرآیند مناسب برای فرآورده‌های گیاه نیشکر است و می‌تواند به طور قابل توجهی تولید انرژی را افزایش و مقدار آب مورد استفاده در گیاه را نیز کاهش دهد. در رابطه با مدیریت ویناس، هضم بی‌هوازی یک روش اقتصادی و راه‌کاری مناسب برای حفظ محیط‌زیست با از بین بردن ویناس است؛ زیرا بیوگاز تولید شده، پس از پالایش، دارای پتانسیل انرژی شبیه به گاز طبیعی با مزایایی چون سوخت تجدیدپذیر و قابلیت دسترسی راحت می‌باشد. با توجه به محتوای غنی از مواد آلی، ویناس یک ماده اولیه‌ی بسیار مناسب برای فرآیند هضم بی‌هوازی بوده و به علت قدرت آلایندگی بسیار بالا، که باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست می‌شود، می‌تواند به‌عنوان خوراک مستعد برای هضم بی‌هوازی محسوب شود (Baez-Smith, 2006; Moran-Salazar et al., 2016). تولید بیوگاز از ویناس به طور عمده برای تولید انرژی، با توجه به محتوای

مواد آلی بالا برای استحصال گاز متان استفاده می‌شود. از سوی دیگر، با وجود اینکه در فرآیند هضم ویناس، بار آلی کاهش می‌یابد، بسیاری از خواص اصلی ویناس به عنوان کود پس از فرآوری حفظ می‌شود. درصورت استحصال همزمان گاز هیدروژن و متان، نیاز به ماده‌ی قلیایی جهت خنثی کردن خاصیت اسیدی ویناس از بین رفته و علاوه بر عدم نیاز به صرف هزینه، گاز با ارزش هیدروژن نیز تولید می‌شود. متان حاصل از هضم بی‌هوازی ویناس نیشکر، می‌تواند به عنوان جایگزین برای سوخت‌های فسیلی و ژنراتور همزمان تولید برق و حرارت، سوخت گازی در وسایل نقلیه و همچنین کربن‌دی‌اکسید حاصل از آن برای شارژ کپسول اطفای حریق، نوشابه‌سازی و گلخانه کاربرد دارد. از هیدروزن تولیدی حاصل از این فرآیند نیز می‌توان در تولید متانول، سوخت موشک و پالایش نفت خام و... استفاده نمود (Baez-Smith, 2006).

## ۳- نتایج و بحث

در این قسمت، با توجه به داده‌های ارائه شده توسط انجمن اتانول ایران در سال ۱۳۹۷، مقادیر ویناس نیشکر تولیدی از تقطیر اتانول در کشور بررسی شده و ارزیابی معادل انرژی آن انجام می‌گیرد.

### 3-1- ویناس تولیدی در ایران

به‌طور متوسط به ازای تولید هر لیتر اتانول، ۱۸-۱۰ لیتر ویناس تولید می‌شود (Salomon & Lora, 2009). با توجه به عدم وجود امکانات پیشرفته تولید اتانول در ایران، به ازای تولید هر لیتر اتانول، ۱۵ لیتر ویناس تولیدی خواهیم داشت. جدول ۱، مقادیر الکل تولیدی و پساب حاصل از آن در ایران را نشان می‌دهد.

**جدول ۱- میزان تولید الکل و پساب حاصل از آن در ایران**

Table 1. Ethonol and its Stillage Production Amount in Iran

| | | |
|---|---|---|
| Actual Ethanol Production | 240000000 | $litr/_{year}$ |
| Daily Ethanol Production | 675000 | $litr/_{day}$ |
| Vinasse Production | 10000000 | $litr/_{day}$ |
| Gasoline Production | 70000000 | $litr/_{day}$ |

نتایج حاصل، میزان تولید حجم عظیمی از ویناس که به طور تقریبی برابر با یک‌هفتم، تولید بنزین روزانه می‌باشد را بیان می‌کنند.

### 3-2- تولید برق و حرارت از بیوگاز

تحقیقات پیشین اثبات نموده‌اند که به ازای هضم بی‌هوازی ۱ $m^3$ ویناس، حدود ۱۴/۶ $m^3$ بیوگاز که شامل ۳۵٪ کربن‌دی‌اکسید و ۶۵٪ متان است، تولید می‌شود. بنابر پژوهش‌های انجام گرفته شده، مقدار تئوری معادل توان الکتریکی به‌ازای هر مترمکعب بیوگاز، در سراسر دنیا بین kWh ۱۰-۶ متغیر است (Santos et al., 2011). در حالی‌که بر اساس تحقیقات و مطالعات میدانی انجام گرفته و پرس‌وجو با افراد متخصص در حوزه‌ی استحصال انرژی از بیوگاز در ایران، مقدار توان الکتریکی تولیدی به ازای هر متر مکعب بیوگاز در کشور، به طور واقعی حدود kWh ۲ گزارش شد.

با در نظر گرفتن مقدار متوسط معادل انرژی الکتریکی kWh ۸ به ازای هر متر مکعب بیوگاز در دنیا، توان و ارزش سالیانه‌ی انرژی الکتریکی تولیدی به صورت تئوری در ایران به شرح زیر محاسبه می‌شود:

مقدار توان الکتریکی تولیدی روزانه $10{,}000 \times 14.6 \times 8 = 1{,}168{,}000$ kWh

ظرفیت توان تولیدی از ویناس در کشور $1{,}168{,}000 \div 24 = 49{,}000$ kW $\approx 49$ MW

ارزش سالیانه برق تولیدی (ریال) $1{,}168{,}000 \times 4{,}000 \times 365 = 1{,}700{,}000{,}000{,}000$ Rs

محاسبه‌ی توان تولیدی با در نظر گرفتن مقدار واقعی معادل انرژی الکتریکی kWh ۲ به ازای هر متر مکعب بیوگاز به شرح زیر است:

مقدار توان الکتریکی تولیدی روزانه $10,000 \times 14.6 \times 2 = 300,000$ kWh

ظرفیت توان تولیدی از ویناس در کشور $300,000 \div 24 = 12.500$ kW $\approx 12.5$ MW

ارزش سالیانه برق تولیدی (ریال) $300,000 \times 4,000 \times 365 = 430,000,000,000$ Rs

با توجه به مقادیر محاسبه شده، در جدول ۲، مقایسه‌ای بین مقادیر توان الکتریکی تولیدشده در نیروگاه سوخت فسیلی و همچنین نیروگاه حاصل از بیوگاز تصفیه فاضلاب و پتانسیل ایجاد نیروگاه حاصل از بیوگاز به‌دست آمده از ویناس انجام گرفته شده است. با توجه با این جدول، حجم ویناس تولیدی در کشور می‌تواند نیروگاهی با ظرفیت ۱۲/۵ مگاوات ایجاد کند که در مقایسه با ظرفیت تصفیه‌خانه‌ی جنوب تهران قابل توجه بوده و می‌تواند راه‌کار اقتصادی برای دفع و مهار ویناس مخرب در نظر گرفته شود.

**جدول ۲- توان سایت نیروگاه فسیلی و بیوگاز در کشور**

Table 2. The capacity of Fossile Fuels and Biogas Plants in Iran

| Plants | Total capacity (MW) |
|---|---|
| Plants in Iran | 80000 |
| Shahid Rajaee plant | 2000 |
| South Tehran wastewater treatment plant | 7.2 |
| Vinasse Plant-Theorical (current study) | 49 |
| Vinasse Plant- Actual (current study) | 12.5 |

با در نظر گرفتن تعرفه برق به قیمت ۴۰۰۰ ریال، ۱ تیلیارد و ۷۰۰ میلیارد ریال برق از ویناس به صورت تئوری و ۴۳۰ میلیارد ریال به صورت تجربی تولید می‌شود.

با در نظر گرفتن تولید گاز متان با درصد خلوص ۰/۶۵ درصد، مقدار متان تولیدی سالیانه حدود ۳۴ میلیون متر مکعب خواهد بود.

مقدار ویناس تولیدی سالیانه $240,000,000 \times 15 = 3,600,000$ m$^3$

مقدار بیوگاز تولیدی سالیانه $3,600,000 \times 14.6 = 52,560,000$ m$^3$

مقدار متان تولیدی سالیانه $52,560,000 \times 0.65 = 34,164,000$ m$^3$

## 3-3- توجیه اقتصادی طرح حاضر

نکته‌ی قابل اهمیت این است که تمامی این برآوردها بدون در نظر گرفتن درآمد و سود حاصل از تولید هیدروژن می‌باشند. در طول هضم بی‌هوازی ویناس به منظور دست‌یابی به گاز متان، pH بایستی بر روی خنثی یعنی ۷ تنظیم شود که مستلزم صرف هزینه برای ماده آلکانیتی می‌باشد، تا pH اسیدی ویناس را افزایش دهد. طی این فرآیند، pH ویناس از ۳ تا ۵/۵ افزایش یافته که این با مقدار مدنظر به اندازه ۱/۵ تفاوت دارد.

با کمک رابطه‌ی (۱)، ۰/۰۳ مول بر لیتر $H^+$ ایجاد می‌شود. روزانه حدود ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ لیتر ویناس در کشور ایران تولید می‌شود که با توجه به مقدار $H^+$، ۳۱۶,۲۵۵ مول $H^+$ باید خنثی شود.

$pH = -10$ غلظت هیدروژن (۱)

$10,000,000 \times 0.03 = 316,255$ mol $H^+$

برای رساندن pH ویناس به مقدار ۷، طی فرآیند هضم بی‌هوازی بایستی معادل مقدار $H^+$ تولید شده، آلکانیتی مصرف شود که شرایط را جهت تولید بیوگاز فراهم سازد. ماده آلکانیتی محلول NaOH با جرم مولی ۴۰ گرم بدین منظور استفاده می‌شود.

$316,255 \times 40 = 12,650,000$ gr

مقدار محلول آلکانیتی مورد نیاز $12,650,000 \div 0.4 \times 1.23 = 40$ m$^3$

با توجه به محاسبات انجام شده، برای تنظیم pH به کمک سود سوزآور ۴۰ درصد و چگالی ۱/۲۳، بایستی ۴۰m$^3$ از این ماده مصرف شود که مستلزم صرف هزینه‌ی بسیاری می‌باشد.. بدین‌منظور، تولید هیدروژن به صورت همزمان یا مقدم بر تولید بیوگاز می‌تواند جایگزین مصرف سود به منظور تنظیم pH شود.

$316,225\ H^+ \longrightarrow 158,000$ mol $H_2$

$158,000 \times 22.4 \times (273 + 25) \div 273 = 3,863,000$ litr $H_2$ / day $\approx 4,000$ m$^3$ $H_2$ / day

با جداسازی گاز هیدروژن در یک مرحله از تولید بیوگاز از فرآیند هضم بی‌هوازی، علاوه بر عدم نیاز به صرف هزینه برای ماده آلکانیتی، ۴۰۰۰ m$^3$ گاز هیدروژن در هر روز تولید می‌شود که با توجه به عدم وجود مرکز تولید هیدروژن در داخل کشور و وارداتی بودن این محصول، با ارائه‌ی پیشنهاد

این طرح، به دست‌یابی فناوری تولید هیدروژن و همچنین توجیه اقتصادی، کاهش COD به بیش از ۷۵ درصد، کمک به حفظ محیط‌زیست و تولید نیروی برق از طریق فرآیند هضم بی‌هوازی ویناس دست خواهیم یافت. به منظور دست‌یابی به اقتصادی‌ترین حالت این فرآیند، بهتر است تولید هیدروژن و متان در یک بیوراکتور اتفاق افتد.

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آلایندگی سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای که سبب گرمایش جهانی زمین شده و آلودگی محیط زیست را در پی دارند، لزوم استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر که میزان آلایندگی آن‌ها بسیار کم و نزدیک به صفر می‌باشد، بیش از پیش احساس می‌شود. بیوگاز یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پاک بوده که از مواد بی‌ارزش همچون پسماندهای آلی، یک ماده‌ی با ارزش مانند گاز متان و هیدروژن تولید می‌کند که می‌تواند منجر به تولید نیروی الکتریکی و توان حرارتی نیز شود. در این پژوهش به بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از پساب حاصل از تقطیر اتانول ملاس نیشکر پرداخته شده و نتایج زیر حاصل گردید:

- سالانه در ایران ۲۴۰ میلیون لیتر الکل اتانول تولید می‌شود که به ازای تولید هر لیتر از این الکل، ۱۵ لیتر ویناس به‌دست می‌آید.
- حجم ویناس تولیدی در ایران بسیار بالا بوده، به‌طوری‌که در مقایسه با تولید بنزین، کسر قابل توجهی را دارا است.
- هر مترمکعب ویناس، طی فرآیند هضم بی‌هوازی، ۱۴/۶ مترمکعب بیوگاز تولید می‌کند. با درنظر گرفتن این مقدار، سالانه ۵۳۲۹۰۰۰۰ مترمکعب بیوگاز می‌توان از ویناس به‌دست آورد.
- با درنظر گرفتن تولید ۲ کیلووات‌ساعت توان الکتریکی به‌ازای هر مترمکعب بیوگاز در ایران، مقدار توان الکتریکی تولیدی از ویناس ۱۲/۵ مگاوات خواهد بود که این مقدار می‌تواند سالانه معادل ۴۳۰ میلیارد ریال برق، به شبکه سراسری تزریق کند.
- با توجه به استحصال بیوگاز با خلوص متان ۶۵ درصد، سالانه حدود ۳۴ میلیون مترمکعب متان می‌تواند طی فرآیند هضم بی‌هوازی ویناس تولید شود.
- با جایگزین کردن استحصال گاز هیدروژن همزمان با گاز متان طی فرآیند هضم بی‌هوازی علاوه بر عدم نیاز به کاربرد ماده‌ی آلکانتی جهت تنظیم pH، روزانه ۴۰۰۰ مترمکعب گاز هیدروژن تولید می‌شود که باعث مقرون‌به‌صرفه بودن این طرح می‌شود.

.

## ۵- تقدیر و تشکر

در این قسمت بر خود وظیفه می‌دانم از انجمن تولیدکنندگان اتانول ایران، پژوهشکده‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس و همچنین از آقای مهندس بهنام حسینقلی‌لو که در انجام این پژوهش یاری‌رسان بنده بودند، کمال تشکر را برجای آورم.

## ۶- مراجع

Abbasi, T., Tauseef, S., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas energy* (Vol. 2): Springer Science & Business Media.

Baez-Smith, C. (2006). Anaerobic digestion of vinasse for the production of methane in the sugar cane distillery. Paper presented at the SPRI Conference on Sugar Processing, Loxahatchee, Florida, USA.

Buitron, G., Kumar, G., Martinez-Arce, A., & Moreno, G. (2014). Hydrogen and methane production via a two-stage processes (H2-SBR+ CH4-UASB) using tequila vinasses. *international journal of hydrogen energy*, 39(33), 19249-19255.

Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management, 33*(12), 2752-2761.

Chum, H. L., & Overend, R. P. (2001). Biomass and renewable fuels. *Fuel Processing Technology*, 71(1-3), 187-195.

de Souza, S. N., Santos, R. F., & Fracaro, G. P. (2011). Potential for the production of biogas in alcohol and sugar cane plants for use in urban buses in the Brazil. Paper presented at the World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden.

GRANATO, E. F., & Silva, C. L. (2002). Geração de energia elétrica a partir do resísuo vinhaça. Procedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural.

Herzog, A. V., Lipman, T. E & ,.Kammen, D. M. (2001). Renewable energy sources. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Forerunner Volume-'Perspectives and Overview of Life Support Systems and Sustainable Development* .

Iran Ethanol Producers Association. (2018). http://www.epa-iran.ir/farsi/indexf.html

Janke, L., Leite, A. F., Batista, K., Silva, W., Nikolausz ,M., Nelles, M., & Stinner, W. (2016). Enhancing biogas production from vinasse in sugarcane biorefineries: Effects of urea and trace elements supplementation on process performance and stability. *Bioresource Technology, 217*, 10-20.

Kannan, A., & Upreti ,R. K. (2008). Influence of distillery effluent on germination and growth of mung bean (Vigna radiata) seeds. *Journal of Hazardous Materials, 153*(1-2), 609-615.

Kothari, R., Kumar, V., Pathak, V. V., & Tyagi, V. (2017). Sequential hydrogen and methane production with simultaneous treatment of dairy industry wastewater: bioenergy profit approach. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(8), 4870-4879.

Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A ,.Montoya, F., Zapata-Sierra, A., & Gil, C. (2013). Scientific production of renewable energies worldwide: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18*, 134-143.

Martin, K., Wolfgang, S., & Andreas, W. (2007). Renewable energy: technology, economics and environment. In: Springer.

Mengistu, M., Simane, B., Eshete, G., & Workneh, T. (2015). A review on biogas technology and its contributions to sustainable rural livelihood in Ethiopia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48*, 306-316.

Moraes, B., Triolo, J. M., Lecona, V. P., Zaiat, M., & Sommer, S. G. (2015). Biogas production within the bioethanol production chain: use of co-substrates for anaerobic digestion of sugar beet vinasse. *Bioresource Technology, 190*, 227-234.

Moran-Salazar ,R., Sanchez-Lizarraga, A., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *SpringerPlus, 5*(1), 1007.

Mshandete, A., Kivaisi, A., Rubindamayugi, M., & Mattiasson, B. (2004). Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource Technology, 95*(1), 19-24.

Reis, C. E. R., de Souza Amaral, M., Loures, C. C. A., Da Rós, P. C. M., Hu, B., Izário Filho, H. J., Silva, M. B. (2014). Microalgal feedstock for bioenergy: opportunities and challenges. In *Biofuels in Brazil* (pp. 367-392): Springer.

Rodrigues Reis, C. E., & Hu, B. (2017). Vinasse from sugarcane ethanol production: better treatment or better utilization? *Frontiers in Energy Research, 5*, 7.

Sadeghzadeh hemayati, s., Ahmadi, H., Taleghani, F., & Amili, H. (2011). Sugar beet seed improvement and research institute, Sugarcane and Development Research Institute, Khuzestan's lateral industries. Ahvaz Khuzestan. Iran.

Salomon, K. R., & Lora, E. E. S. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and bioenergy, 33*(9), 1101-1107.

Santos, R., Borsoi, A., Secco, D., de Souza, S., & Constanzi, R. (2011). *Brazil's potential for generating electricity from biogas from stillage.* Paper presented at the proceeding at World Renewable Energy Congress.

Volpini, V., Lovato, G., Albanez ,R., Ratusznei, S., & Rodrigues, J. (2018). Biomethane generation in an AnSBBR treating effluent from the biohydrogen production from vinasse: Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimation. *Renewable Energy, 116*, 288-298.

Walter, A ,.Dolzan, P., Quilodrán, O., de Oliveira, J. G., Da Silva, C., Piacente, F., & Segerstedt, A. (2011). Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy, 39*(10. 5703-5716).

Wilfert, R., & Schattauer, A. (2004). Ecological analysis. *Biogas utilization from liquid manure, organic waste and cultivated biomass–a technical, ecological and economic analysis. Leipzig (Germany): Institute for Energy and Environment, Deutsche Bundesstifung Umwelt (DBU).*

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران