

## توليد بيوانرزي از گياه سورگوم شيرين آبياري شده با پساب در مقياس آزمايشگاهي و پايلوت

عباس المدرس\*

اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه زيست شناسي

(تاريخ دريافت: ۹۳/۰۳/۱۵ - تاريخ پذيرش: ۹۴/۰۵/۰۴)

### چکيده

هدف اين تحقيق کشت گياه سورگوم شيرين و آبياري آن با کيفيت هاي مختلف آب آبياري به منظور توليد سوخت هاي زيستي بود. اين آزمايش در تصفيه خانه شرق شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان در سال ۱۳۹۱ انجام گرفت. گياه سورگوم شيرين با سه کيفيت فاضلاب خام، پساب فاضلاب و آب کشاورزي آبياري شد. نتايج نشان داد حداکثر بيوماس (۸۷ تن در هکتار) در تيماهاي آبياري شده با فاضلاب خام و پساب فاضلاب و حداقل آن (۶۶ تن در هکتار) در تيماهاي آبياري شده با آب کشاورزي به دست آمد. تعداد کل کليفرم در فاضلاب خام و پساب فاضلاب به ترتيب  $1/2 \times 10^4$  و  $1/9 \times 10^4$  بود، ولي تعداد آنها در ساقه، دانه و برگ گياه سورگوم شيرين کمتر از  $1/0 \times 10^2$  بود. با کشت يک هکتار سورگوم شيرين ۶۳۷۲ ليتر اتانول توليد شد. از محصولات جانبي آن ۱۵۴۳۵ مترمکعب سي ان جي توليد شد که مي توان آن را در وسايل نقليه گازسوز مصرف کرد. همچنين، همزمان ۴۳۲۱۸ کيلووات ساعت برق براي اتصال به شبکه سراسري برق، ۳۶۹۹۴ مگاکالري حرارت براي خودکفايي انرزي کارخانه اتانول و ۱۶ تن کود آلي براي مصرف در کشاورزي توليد شد.

واژه هاي کليدي: بيواتانول، بيوانرزي، پساب فاضلاب، سوخت زيستي، سورگوم شيرين.

### ۱. مقدمه و هدف

شده بود- بيشتري بود. مشکلات استفاده از پساب فاضلاب براي آبياري گياهان ممکن است به علت تجمع فلزات سنگين و جذب باکترهاي بيمايي را از سوي گياه از پساب باشد که براي مصرف کننده مسموميت گوارشي ايجاد مي کند [۴]. غلاوي و همکاران [۵] ۵ تيماهاي آبياري شامل آب چاه، پساب فاضلاب و ترکيبي از آنها را در طول فصل رشد درمورد سورگوم علوفه اي بررسي کردند. نتايج آنها نشان داد آبياري با پساب فاضلاب موجب افزايش عناصر مورد نياز گياه از جمله ازت، فسفر، پتاس و منيزيم شد. همچنين، آبياري با پساب موجب افزايش فلزات سنگين روي، آهن و موليبدن در خاک و مس و آهن در گياه شد. اگر استانداردهاي سازمان محيط زيست رعايت شود، استفاده از پساب براي آبياري گياهان زراعي امکان پذير مي شود. شايد ذکر است رعايت استانداردهاي محيط زيست به اعتبارات زيادي نياز دارد که در

بحران کمبود آب به يکي از اساسي ترين مشکلات جهان تبديل شده است. ايران نيز به دليل داشتن اقليمي خشک و نيمه خشک به طور جدي با کمبود منابع آب مواجه است [۱]. محدوديت منابع آب هاي شيرين سطحي و سفره هاي زيرزميني، موجب توجه محققان به کاربرد اصولي آب هاي نامتعارف مانند آب هاي شور، فاضلاب هاي خانگي و صنعتي شده است [۲]. پساب فاضلاب آثار مثبتتي بر خاک و رشد گياهان به علت افزايش مواد آلي و عناصر غذايي مانند ازت، فسفر و پتاس دارد [۳]. معظم و همکاران [۲] گزارش کردند ارتفاع ساقه، قطر ساقه، تعداد دانه، وزن هزار دانه و درصد قند در گياهان سورگوم آبياري شده با پساب فاضلاب نسبت به ديگر گياهان سورگوم- که در زمين هايي کشت شده بودند که کودهاي شيميايي به آن اضافه شده و با آب کشاورزي آبياري

شیمیایی نیازی نیست. بیواتانول از ساقه‌ها و دانه‌های گیاه سورگوم شیرین تولید می‌شود. این گیاه با پساب فاضلاب آبیاری می‌شود؛ بنابراین، بقایای این گیاه را نمی‌توان به مصرف دام رساند، زیرا بقایای سورگوم شیرین حاوی مقدار متناهی مواد قندی، نشاسته‌ای، پروتئینی و چربی است که می‌توان از آن‌ها به منظور تولید بیوگاز در شرایط غیرهوازی استفاده کرد. بیوگاز تولیدی پس از خالص‌سازی در وسایل نقلیه گازسوز مصرف می‌شود. همچنین، می‌توان از بیوگاز تولیدی همزمان برق و حرارت تولید کرد و بقایای فرایند تولید بیوگاز را در هاضم به‌عنوان کود آلی با کیفیت بالا و بدون هرگونه بوی مشمئزکننده به‌کار برد. هدف از این تحقیق آبیاری گیاه سورگوم شیرین به‌منظور تولید بیواتانول و بیوگاز است.

## ۲. مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت در تصفیه‌خانه شرق اصفهان در سال ۱۳۹۱ انجام گرفت. مقیاس آزمایشگاهی: این تحقیق در قالب طرح‌های یک‌بار خورد شده با بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل آبیاری با آب کشاورزی (شاهد)، آبیاری با فاضلاب خام و آبیاری با پساب فاضلاب بود. قبل از کاشت، نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر برداشت شد و پی‌اچ<sup>۱</sup>، فسفر، پتاس، نیترات و نیتروژن آن تعیین شد. همچنین، نمونه‌های خاک در پایان دوره رشد برداشته شد و اندازه‌گیری‌های بالا روی آن‌ها انجام گرفت. قبل از آزمایش نمونه‌ای از خاک، آب کشاورزی و فاضلاب خام و پساب فاضلاب برداشته شد و از نظر کلیفرم کل<sup>۲</sup>، نیتروژن کل<sup>۳</sup>، فسفر کل<sup>۴</sup>، ذرات جامد معلق کل (تی اس اس)<sup>۵</sup>، اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی (سی او دی)<sup>۶</sup> و اکسیژن مورد نیاز واکنش زیستی (بی او دی)<sup>۸</sup> اندازه‌گیری شد.

هر کرت شامل شش ردیف به طول ده متر بود. فاصله بین بلوک‌ها سه متر بود. بذر سورگوم شیرین سفرا در ردیف‌هایی به فاصله ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر کشت

حال حاضر تأمین این اعتبارات امکان‌پذیر نیست و اکنون به علت آبیاری سبزیجات، میوه‌ها و... با فاضلاب، مسمومیت‌های گوارشی در سطح کشور مشاهده می‌شود. یکی از راه‌های به‌کارگرفتن پساب فاضلاب بدون نیاز به اعتبارات گزاف، استفاده از آن در آبیاری گیاهان صنعتی است. محدود شدن منابع انرژی مانند سوخت‌های فسیلی و افزایش آلودگی هوا با انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوختن منابع فسیلی به تشدید گرم شدن کره زمین و بحران انرژی منجر شده است. سوخت‌های زیستی از این نظر مهم هستند که موجب کاهش سوخت‌های فسیلی، آلودگی هوا و گازهای گلخانه می‌شوند. همچنین، اکتان بنزین پایین است و برای افزایش آن به مواد افزودنی نیاز است. این مواد یا مکمل‌های بنزین شامل سرب و ام تی بی ای<sup>۱</sup> است که سرب آلاینده هوا و ام تی بی ای آلاینده آب‌های زیرزمینی و سرطان‌زاست. در حال حاضر بیواتانول به‌عنوان مکمل بنزین، جایگزین سرب و ام تی بی ای می‌شود [۶]. امروزه سوخت‌های زیستی به‌طور عمده از منابع زیست توده تولید می‌شوند. بیواتانول را می‌توان از مواد قندی، نشاسته‌ای و سلولزی تولید کرد. مواد قندی مانند چغندر قند و نیشکر و مواد نشاسته‌ای مانند گندم، ذرت و... مصارف انسانی و دامی دارند و نمی‌توان از آن‌ها برای تولید بیواتانول استفاده کرد. تولید بیواتانول از مواد سلولزی هنوز صنعتی نشده است. در کشور ما، مواد اولیه برای تولید بیواتانول به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که مصرف انسانی و دامی نداشته باشند و با شرایط گرم و خشک کشور سازگار باشند. سورگوم شیرین تنها گیاهی است که می‌توان از آن برای تولید بیواتانول استفاده کرد. از آنجاکه گیاه سورگوم شیرین برای تولید بیواتانول [۷] جزء منابع غذایی انسانی و دامی نیست و با شرایط گرم و خشک کشور سازگار است [۸]، نسبت به سایر مواد اولیه تولید بیواتانول همچون نیشکر و ذرت در اولویت است. هدف از کشت گیاه سورگوم شیرین تولید بیواتانول است؛ بنابراین، گیاه صنعتی محسوب می‌شود و می‌توان آن را با پساب فاضلاب آبیاری کرد. از دیگر مزایای این گیاه آبیاری شده با پساب فاضلاب برای تولید بیواتانول، غیررقابتی بودن زمین‌های زیرکشت با زمین‌های زراعی (استفاده از زمین‌های حاشیه‌ای با ویژگی‌های نامناسب خاک مثل شوری، بافت نامناسب خاک، خشکی و غیره) است [۹]. علاوه بر این، توقع این گیاه نسبت به داده‌های کشاورزی کم است و مواد غذایی مورد نیاز آن از قبیل ازت، فسفر، پتاس و... در پساب فاضلاب وجود دارد؛ بنابراین، به کودهای

1. Methyl tert-butyl ether (MTBE)
2. pH
3. Total coliform
4. Total Nitrogen (TN)
5. Total Phosphorus (TP)
6. Total Suspended Solids (TSS)
7. Chemical Oxygen Demand (COD)
8. Biological Oxygen Demand (BOD)

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اس آ اس<sup>۴</sup> تجزیه و تحلیل آماری شد و میانگین صفات مورد نظر از طریق آزمون چنددامنه دانکن مقایسه شد.

مقیاس نیمه‌صنعتی: این آزمایش با کشت سورگوم شیرین سفرا آبیاری شده با پساب فاضلاب در سطح یک هکتار انجام گرفت. در زمان رسیدن دانه‌ها گیاهان برداشت شد و به مرکز تحقیقات دانشگاه اصفهان ارسال شد. بیوماس گیاهان تعیین شد. سپس گیاهان از دستگاه چاپر ساخته شده در دانشگاه اصفهان عبور دادند، به طوری که ساقه‌ها، برگ‌ها و دانه‌ها از هم جدا شدند و ساقه‌های بدون برگ و دانه به قطعات ۲-۴ سانتی‌متر تقسیم شدند. وزن ساقه‌ها، دانه‌ها و برگ‌ها تعیین شد. شربت ساقه با استفاده از دستگاه دیفیوژن استخراج شد و حجم آن تعیین شد. شربت استخراجی وارد فرمانتور نیمه‌صنعتی شد و با اضافه کردن مخمر و مواد غذایی مورد نیاز، درصد اتانول آن به ۹/۵ درصد رسید. الکل به دست آمده وارد ستون‌های تقطیر نیمه‌صنعتی شد و درصد اتانول آن به ۹۵ رسید. بقایای گیاه شامل باگاس، برگ‌ها، دانه‌ها و بقایای آن و استیلیج ساقه‌ها خشک شد و توزین شد. نمونه‌ای از این بقایا به مرکز بیوگاز وزارت نیرو واقع در ساوه ارسال شد. مقدار سی ان جی، الکتریسته، حرارت و کود آلی براساس مقدار بیوگاز و گازمتان تولیدی محاسبه شد. مقدار سی ان جی براساس گاز متان (۹۵ درصد خلوص) تعیین شد. مقدار برق با توجه به اینکه هر مترمکعب گاز متان برابر ۳۶ مگاژول و هر کیلووات ساعت برق برابر ۳/۶ مگاژول و بازده موتورهای گازسوز ۳۸ درصد است، محاسبه شد. مقدار حرارت با توجه به اینکه بازده انرژی حرارتی ۴۲ درصد و هر کیلووات ساعت برق برابر ۰/۸۵۶ مگا کالری است، محاسبه شد. مقدار کود آلی براساس اینکه ۴۵ درصد ماده خشک را تشکیل می‌دهد که ۶۰ درصد آن کود مایع و ۴۰ درصد بقیه کود آلی خشک است، محاسبه شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. شرایط محل کاشت

مشخصات کمی و کیفی سه نوع آب آبیاری مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. طبق استاندارد سازمان محیط‌زیست، تعداد کل کلیفرم، در ۱۰۰ میلی‌لیتر نمونه در

شد. دوره آبیاری با توجه به نیاز گیاه و قبل از ایجاد تنش اعمال شد. برداشت محصول در زمان رسیدن دانه‌ها انجام گرفت. برای اندازه‌گیری‌ها از وسط هر کرت یک متر برداشت شد و بیوماس<sup>۱</sup> آن تعیین شد. سپس برگ‌ها و دانه‌ها از کل گیاه جدا شد، ساقه‌های بدون برگ و بذر توزین شد و مقدار قند (بریکس<sup>۲</sup>) پس از عبور ساقه از غلتک تعیین شد. مقدار اتانول براساس درصد قند کل، وزن تر ساقه (۷۵ درصد بیوماس) و سایر عوامل مؤثر در تولید آن به دست آمد. درصد قند کل براساس مقدار بریکس اصلاح شده از طریق رابطه<sup>۱</sup> محاسبه شد:

(۱)

$$\text{مقدار قند کل } (\%) = 0.8111 \times \text{بریکس } (\%) - 0.3728$$

مقدار اتانول با توجه به رابطه<sup>۲</sup> تعیین شد [۷]:

(۲)

$$\text{مقدار اتانول (لیتر بر هکتار)} = \text{مقدار قند کل } (\%) \times$$

مقدار بیوماس تازه (تن بر هکتار)  $\times 6/5$  (فاکتور تبدیلی اتانول از قند)  $\times 0.85$  (بازدهی فرایند تولید اتانول از قند)  $\times$  دانسیته ویژه اتانول (گرم بر میلی‌لیتر)

به منظور تعیین تعداد باکتری‌های کلیفرم کل و کلیفرم گوارشی؛ نمونه‌های خاک، ساقه، دانه و برگ جداگانه در شیشه‌های استریل قرار گرفت و در یخدان حاوی یخ به آزمایشگاه منتقل شد و در یخچال آزمایشگاه قرار داده شد. نمونه برداری از خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متری انجام گرفت. نمونه‌های گیاهی به دو صورت ضدعفونی شده سطحی به منظور تعیین تعداد کل کلیفرم جذب شده از ریشه گیاه و ضدعفونی نشده سطحی به منظور تعیین مجموع کل کلیفرم‌های موجود در سطح و داخل گیاه بررسی شدند. از روش ام پی ان<sup>۳</sup> (روش ۹ لوله‌ای) [۱۱] برای تخمین باکتری‌های مذکور استفاده شد. قبل از آزمایش، نمونه‌ها ابتدا به قطعات ۳-۴ سانتی‌متری بریده شدند و مدت یک دقیقه در الکل ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس به مدت دو دقیقه با هیپوکلریت سدیم ۲ درصد و پس از آن چهار مرتبه با آب استریل شسته شدند. سپس نمونه‌ها با قیچی استریل به قطعات کوچک‌تر بریده شدند و داخل محلول بافر فسفات نمکی روی شیکر به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند [۱۲]. نمونه‌های گیاهی ضدعفونی نشده سطحی نیز ابتدا به قطعات ریز تقسیم شدند و سپس داخل محلول بافر فسفات قرار داده شدند. همچنین، نمونه خاک هر تیمار جداگانه به مدت ۳۰ دقیقه با بافر فسفات روی شیکر قرار داده شد و سپس از عصاره آن برای کشت میکروبی استفاده شد.

1. Biomass

2. Brix

3. Most probable number (MPN)

4. Statistical analysis system (SAS)

فاضلاب موجب افزایش پی اچ خاک و عناصر معدنی مانند فسفر، پتاس، نیترات و نیتروژن شده است. پی اچ در پایان دوره رشد (۸) کمتر از حد بحرانی (۸/۵) براساس استاندارد کیفیت آب کشاورزی سازمان خواربار کشاورزی برای استفاده در کشاورزی است [۱۳]. نتایج با گزارش‌های غلاوی و همکاران [۵] مبنی بر افزایش پی اچ خاک در اثر آبیاری با فاضلاب مطابقت دارد. در پایان دوره رشد، مقدار ازت، نیترات، فسفر و پتاس افزایش یافت. این عناصر برای رشد گیاه لازمند؛ بنابراین، پساب نه تنها یک منبع آبیاری است؛ بلکه عناصر غذایی را برای رشد گیاه تأمین می‌کند [۳].

خروجی فاضلاب‌ها باید ۱۰۰۰ باشد. تعداد کل کلیفرم در فاضلاب خام و پساب فاضلاب به ترتیب  $1/2 \times 10^4$  و  $1/9 \times 10^4$  است؛ بنابراین، از فاضلاب خام و پساب فاضلاب نمی‌توان برای مصارف کشاورزی استفاده کرد. مقدار سی او دی فاضلاب خام بیشتر از فاضلاب تصفیه شده بود. مقدار سی او دی بیانگر گاز متان تولیدی و در نتیجه مقدار برق است، به طوری که از هر کیلوگرم سی او دی  $0/35$  مترمکعب گاز متان تولید می‌شود که برابر است با  $3/84$  کیلووات ساعت برق. نتایج تجزیه خاک قبل از کاشت و در پایان دوره رشد برای سورگوم‌های آبیاری شده با آب کشاورزی، فاضلاب خام و پساب فاضلاب در جدول ۲ ارائه می‌شود. آبیاری با پساب

جدول ۱. مشخصات کمی و کیفی سه نوع آب آبیاری

کلیفرم کل	تی ان	تی پی	تی اس اس	سی او دی	بی او دی	کیفیت آب
ND	ND	ND	ND	ND	ND**	آب کشاورزی
$1/2 \times 10^4$	۴۷/۸	۱۳/۷	۱۷۷	۴۲۵	۲۲۹	فاضلاب خام
$1/9 \times 10^4$	۳۸/۳	۱۱/۹	۱۰۵	۹۰	۳۳	پساب فاضلاب

منبع: آزمایشگاه سازمان آب و فاضلاب استان اصفهان  
\* غیر قابل تشخیص

جدول ۲. آنالیز خاک قبل از کشت و در پایان دوره رشد با سه کیفیت آب آبیاری

صفات	قبل از کشت	آب کشاورزی	فاضلاب خام	پساب فاضلاب
پی اچ	۷/۶	۷/۴	۰/۸	۸/۰
فسفر (پی پی ام)	۱۶/۵	۱۷/۰	۴۴/۰	۴۴/۰
پتاسیم (پی پی ام)	۴۳۰/۰	۴۳۰/۰	۳۷۰/۰	۴۱۰/۰
نیترات (پی پی ام)	۷/۰	۷/۵	۱۹/۵	۲۳/۰
نیتروژن (پی پی ام)	۰/۰۲۶	۰/۰۲۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۸

فاضلاب خام بیشتر از گیاهان آبیاری شده با پساب فاضلاب و آب کشاورزی بود؛ بنابراین، حداکثر مقدار اتانول (۶۵۹۰ لیتر در هکتار) در گیاهان سورگوم شیرین آبیاری شده با فاضلاب خام و حداقل آن (۴۴۶۶ لیتر در هکتار) در گیاهان آبیاری شده با آب کشاورزی بود. آبیاری با فاضلاب خام و پساب فاضلاب دارای مزایای افزایش عملکرد، درصد قند و در نتیجه مقدار اتانول است، اما استفاده از این فاضلاب‌ها ممکن است موجب افزایش فلزات سنگین و بیماری‌زا در خاک و گیاه شود. در نتیجه، کل کلیفرم در خاک قبل از کشت و بعد از برداشت گیاهان سورگوم شیرین آبیاری شده با فاضلاب خام، پساب فاضلاب و آب کشاورزی مقایسه شدند که در سطح ۵ درصد معنی‌دار بودند (عدد پی کمتر از ۰/۰۵). مقایسه میانگین آن‌ها در جدول ۴ ارائه می‌شود.

بررسی‌ها نشان داد بیوماس برای سه کیفیت آب آبیاری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (عدد پی کمتر از ۰/۰۵)، ولی برای بریکس معنی‌دار نبود (عدد پی کمتر از ۰/۱۵). مقایسه میانگین‌های بیوماس، بریکس و اتانول در جدول ۳ ارائه می‌شود. بیوماس در فاضلاب خام و پساب فاضلاب بیشتر از گیاهان آبیاری شده با آب کشاورزی بود. افزایش بیوماس در گیاهان آبیاری شده با فاضلاب خام و پساب فاضلاب نسبت به آب کشاورزی، به علت وجود عناصر معدنی در این فاضلاب‌هاست. مقدار بریکس بین کیفیت‌های مختلف آب آبیاری تفاوت آماری نداشت، اما مقدار آن در فاضلاب خام بیشتر از پساب فاضلاب و آب کشاورزی بود. مقدار بیوماس و بریکس عوامل مهمی در تعیین مقدار بیواتانول هستند [۷]. مقدار بیوماس و درصد بریکس در گیاهان آبیاری شده با

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های بیوماس، بریکس و اتانول تولیدی سورگوم شیرین آبیاری شده با سه کیفیت آب آبیاری

اتانول (لیتر در هکتار)	بریکس (درصد)	بیوماس (تن در هکتار)	کیفیت آب
۴۴۶۶/۱۶	۱۶/۱۶/a	۶۶/۶۶b*	آب کشاورزی
۵۹۴۶/۹۱	۱۶/۶۶ a	۸۶/۰۰a	پساب فاضلاب
۶۵۹۰/۰۶	۱۸/۰۰a	۸۷/۳۳ a	فاضلاب خام

\* میانگین‌هایی که در یک حرف مشترکند، در سطح ۵ درصد دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۴. مقایسه تعداد کل کلیفرم (ام پی ان در ۱۰۰ میلی‌لیتر) در خاک قبل از کشت و آبیاری شده با سه کیفیت آب آبیاری

فاضلاب خام	پساب فاضلاب	آب کشاورزی	قبل از کشت	تیمار
۲/۴×۱۰ <sup>۳</sup> b	۱/۵۰×۱۰ <sup>۳</sup> a	۱/۱۵×۱۰ <sup>۳</sup> a	۱/۱۸×۱۰ <sup>۳</sup> a*	تعداد کل کلیفرم

\* میانگین‌هایی که در یک حرف مشترکند، در سطح ۵ درصد دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

معنی‌داری بیشتر از دانه و ساقه بود. به نظر می‌رسد تعداد بیشتر کل کلیفرم در برگ‌ها به علت انتقال آن‌ها از خاک به ریشه، ساقه و برگ نبوده است و ممکن است ورود آن‌ها از طریق روزه‌های برگ‌هایی که در نزدیکی منبع آبیاری (فاضلاب خام) هستند، انجام گرفته باشد. براساس نتایج، پیشنهاد می‌شود گیاهانی که از برگ آن‌ها (کاهو، کلم، سبزیجات و...) استفاده می‌شود، با فاضلاب خام آبیاری نشوند.

جدول ۵. تعداد کل کلیفرم (ام پی ان در ۱۰۰ میلی‌لیتر) در خاک قبل از کشت و در پایان دوره رشد و در قسمت‌های مختلف گیاه که بعد از برداشت ضدعفونی سطحی شده است، با سه کیفیت آب آبیاری

پساب فاضلاب	فاضلاب خام	آب کشاورزی	تیمار
۲۹ a	۳۷ a	۵۱a*	ساقه
۴۳ a	۲۴ a	۳۴ a	دانه
۶۶ a	۳۷ a	۲۴a	برگ

\* میانگین‌هایی که در هر ردیف در یک حرف مشترکند، در سطح ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

جدول ۶. تعداد کل کلیفرم (ام پی ان در ۱۰۰ میلی‌لیتر) در خاک قبل از کشت و در پایان دوره رشد و در قسمت‌های مختلف گیاه که بعد از برداشت ضدعفونی سطحی نشده است، با سه کیفیت آب آبیاری

پساب فاضلاب	فاضلاب خام	آب کشاورزی	تیمار
۵۹ a	۸۱ a	۵۳a	ساقه
۵۳a	۸۴ a	۴۰a	دانه
۱۹۱a	۳۷۶b	۱۲۱a	برگ

\* میانگین‌هایی که در هر ردیف در یک حرف مشترکند، در سطح ۵ درصد آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری ندارند.

تعداد کل کلیفرم در خاک آبیاری شده با فاضلاب خام به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر خاک‌ها بود. تعداد کل کلیفرم در خاک‌های آبیاری شده با آب کشاورزی و پساب فاضلاب اختلاف معنی‌داری با خاک قبل از کشت نداشت. تعداد کل کلیفرم در فاضلاب خام و پساب فاضلاب به ترتیب  $۱/۹ \times 10^4$  و  $۱/۲ \times 10^4$  (جدول ۱) بود، ولی در خاک آبیاری شده با آن‌ها به ترتیب  $۲/۴ \times 10^3$  و  $۱/۵۰ \times 10^3$  بود. به نظر می‌رسد خاک قادر به کاهش باکتری‌هاست. نمونه‌های گیاهی به دو صورت ضدعفونی شده سطحی به منظور تعیین تعداد کل کلیفرم جذب شده از ریشه گیاه و ضدعفونی نشده سطحی به منظور تعیین مجموع کل کلیفرم‌های موجود در سطح و داخل گیاه بررسی شدند. تعداد کل کلیفرم در نمونه‌هایی که ضدعفونی سطحی شده بودند در تمام قسمت‌های مختلف گیاه و آبیاری شده با فاضلاب خام، پساب فاضلاب و آب کشاورزی معنی‌دار نبودند (جدول ۵). عدد پی برای برگ کمتر از ۰/۵، ساقه کمتر از ۰/۱۶ و دانه کمتر از ۰/۵۳ بود. تعداد باکتری‌ها در خاک بعد از برداشت سورگوم شیرین بیشتر از ۱۰۰۰ عدد (ام پی ان در ۱۰۰ میلی‌لیتر) بود، اما تعداد آن‌ها در ساقه، دانه و برگ گیاهان سورگوم شیرین آبیاری شده با سه کیفیت آب آبیاری کمتر از ۱۰۰ (ام پی ان در ۱۰۰ میلی‌لیتر) بود. به نظر می‌رسد ریشه گیاهان سورگوم شیرین قادرند از ورود باکتری‌ها تا حد زیادی جلوگیری کنند. در نمونه‌هایی که ضدعفونی سطحی نشده بودند، تعداد کل کلیفرم در برگ در سطح ۵ درصد (کمتر از ۰/۰۵) معنی‌دار بود، ولی برای دانه (کمتر از ۰/۱۹) و ساقه (کمتر از ۰/۳) معنی‌دار نبود (جدول ۶). تعداد کل کلیفرم در برگ‌هایی که ضدعفونی سطحی نشده بودند در گیاهان آبیاری شده با فاضلاب خام به‌طور

در ساقه، دانه و برگ گیاهان آبیاری شده با فاضلاب خام و پساب فاضلاب کلیفرم مدفوعی مشاهده نشد.

محصولات تولیدی اصلی از سورگوم شیرین بیواتانول و محصولات جانبی آن سی ان جی، برق، حرارت و کود آلی است. از یک هکتار سورگوم شیرین در سطح نیمه صنعتی ۶۳۷۲ لیتر اتانول (ساقه و دانه سورگوم) تولید شد. بقایای سورگوم شیرین پس از استخراج شربت دارای ۴ درصد قند بود که از آن در شرایط غیرهوازی بیوگاز تولید شد. نتایج آزمایش های بیوگاز ساوه نشان داد بیوگاز تولیدی از ساقه های سورگوم شیرین دارای ۷۰ درصد گاز متان و مقدار گاز متان تولیدی آن ۴۴۱ لیتر به ازای هر کیلوگرم ماده خشک ساقه سورگوم شیرین است. خلوص گاز متان تولیدی به منظور مصرف در وسایل نقلیه گازسوز باید ۹۵ باشد، در حالی که گاز تولیدی دارای ۷۰ درصد متان بود؛ بنابراین، گاز متان تولیدی را می توان خالص کرد و درصد آن را به ۹۵ درصد خلوص رساند و در وسایل نقلیه گازسوز استفاده کرد. مقدار سی ان جی تولیدی برای استفاده در وسایل نقلیه گازسوز ۱۵۴۳۵ مترمکعب در هر هکتار سورگوم شیرین است. همچنین، می توان از ژنراتورهای گازسوز استفاده کرد و همزمان برق و حرارت تولید کرد. محاسبه ها نشان می دهد مقدار برق و حرارت تولیدی از یک هکتار سورگوم شیرین به ترتیب ۴۳۲۱۸ کیلووات ساعت برق و ۳۶۹۹۴ مگا کالری است که برق تولیدی علاوه بر رفع نیاز کارخانه تولید اتانول، به شبکه سراسری فروخته می شود. از حرارت تولیدی می توان برای رفع نیازهای کارخانه استفاده کرد. کود آلی ماده جانبی هاضم است که کشاورزان از آن به عنوان کود آلی استفاده می کنند. مقدار کود آلی تولیدی در هاضم پس از تولید بیوگاز، ۱۶ تن در هر هکتار سورگوم شیرین است.

نتایج نشان داد پساب فاضلاب نه تنها یک منبع مهم آبیاری برای گیاهان صنعتی است؛ بلکه به علت داشتن مواد مورد نیاز گیاه، موجب رشد آن می شود. کشت سورگوم

شیرین در تولید بیواتانول - که موجب کاهش آلودگی هوا می شود - به کار می رود و علاوه بر این می توان از بقایای آن در تولید سی ان جی برای مصرف در وسایل نقلیه گازسوز، الکتریسته برای اتصال به شبکه سراسری برق، حرارت برای خودکفایی انرژی مورد نیاز کارخانه تولید اتانول و کود آلی برای مصرف در کشاورزی استفاده کرد.

با توجه به نتایج، پیشنهاد می شود سورگوم با پساب فاضلاب آبیاری شود.

#### ۴. جمع بندی

مزایای جایگزین کردن سوخت های زیستی با سوخت های فسیلی؛ تولید سوخت پاک، کاهش آلودگی هوا، کاهش هزینه های سوخت و بازیافت پسماندهای گیاه سورگوم شیرین است. سورگوم شیرین تنها گیاهی است که با شرایط گرم و خشک کشور سازگار است و علاوه بر تولید بیواتانول می توان با استفاده از آن محصولات جانبی با ارزشی تولید کرد. ایران با بحران کمبود آب شیرین مواجه است؛ بنابراین، برای آبیاری گیاهان سورگوم شیرین - به منظور رقابت نکردن با گیاهان زراعی - از پساب فاضلاب استفاده شد. پساب فاضلاب به دلیل داشتن مواد معدنی مفید برای رشد گیاه، هزینه های مربوط به کوددهی را کاهش می دهد و سرعت رشد و عملکرد گیاه را به طور چشم گیری افزایش می دهد. با کشت گیاهان سورگوم شیرین می توان علاوه بر تولید بیواتانول، سی ان جی برای مصرف در وسایل نقلیه گازسوز، برق و حرارت تولید کرد و از محصول جانبی هاضم در شرایط غیرهوازی کود آلی تولید کرد.

#### تشکر و قدردانی

از شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان به دلیل حمایت و همکاری در این پروژه سپاسگزاریم.

#### مراجع

[۱]. احمدزاده، ز. (۱۳۸۷). "بحران آب در ایران، جهان و توسعه پایدار"، فصلنامه توسعه بهره‌وری (ویژه بهره‌وری آب)، شماره ۸-۷، ۳۴-۳۵.

[2]. Moazzam A., Shahid S. and Omme H. (2010). "Irrigation of sorghum crop with waste stabilization pond effluent: growth and yield response". *Pakistan Journal of Botany*. 42, 1665-1674.

[3]. Ghanbari, A., Abedikoupai, J. and Taie Semiromi, J. (2007). "Effect of municipal wastewater irrigation on yield and quality of wheat and some soil properties in sistan zone". *Journal of Science and technology of agriculture and natural resources*. 10, 59-74.

- [4]. Gro, S., Johannessen, G. B., Bengtsson B.T. and Heier, S., (2004). "Potential Uptake of Escherichia coli O157:H7 from Organic Manure. Journal of applied and environmental microbiology 12(5): 14-20.
- [5]. Galavi, M., Jalali A., Mousavi, S.R. and Galavi, H. (2009) "Effect of Treated Municipal Wastewater on Forage Yield, Quantitative and Qualitative Properties of Sorghum (S. bicolor Speedfeed)". Asian Journal of plant Sciences. 8, 489-494.
- [6]. Balat M., Balat, H. (2009). "Recent trends in global production and utilization of bio- ethanol fuel". Applied Energy. 86, 2273-2282.
- [7]. Sakellariou, M.M., Papalexis, S., Nakos, N. and Kalavrouziotis, I.K. (2007). "Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (Var. Keller) on a dry year in central Greece". Agricultural Water Management. 90, 181-189.
- [8]. Almodares, A. and Mostafafi Darany. (2006). "Effects of planting date and time of nitrogen application on yield and sugar content of sweet sorghum". Journal of Environmental Biology. 27, 601-605.
- [9]. Almodares, A. and Hadi, M.R. (2009). "Production of bioethanol from sweet sorghum: A review". African Journal of Agricultural Research. 4, 772-780.
- [10]. Liu, R., Li, J., Shen, F. (2008). "Refining bioethanol from stalk juice of sweet sorghum by immobilized yeast fermentation". Renewable Energy. 33, 1130-1135.
- [11]. Greenberg, A. E., Trussell, R. H. and Clesceri, L. S. (1985). "Standard Method for the Examination of Water and Waste water". 16th Edition, APHA. AWWA. WPCF, New York, Parts 400 and 900, 1985.
- [12]. Chanikarn, K. (2005). "Diazotroph endophytic bacteria in cultivated and wild rice in Thailand". Science Asia 23:32-36.
- [13]. Pescod, M.B. (1992). "Wastewater Treatment and Use in Agriculture". FAO United Nations, Rome, Italy, Page 125.