

## مقاله پژوهشی

# استفاده از جدول جستجوی منطق فازی در مدل‌سازی رهایش گلوکز از نشاسته‌های گندم

علیرضا یوسفی<sup>۱\*</sup>، شهلا خدابخش اقدم<sup>۲</sup>، رضا ثقفی<sup>۳</sup>، سید محمد علی رضوی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

۲. دکترا، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

۳. استادیار، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بناب

۴. استاد تمام، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۹)

## چکیده

در این تحقیق نشاسته‌های فسفریله و هیدروکسی پروپیله با درصدهای جایگزینی به ترتیب ۰/۰۹۶ و ۲/۱۰۶٪ از نشاسته طبیعی گندم تولید شدند. سپس ژل نمونه‌های نشاسته با غلظت‌های ۸ و ۱۲٪ و در حجم‌های ۷/۵ ml و ۱۵ تهیه‌شده و تحت شرایط هضم در دهان، معده و روده شبیه‌سازی‌شده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حدود ۸۰٪ از میزان گلوکز رهایش یافته نهایی، در ۱۵ min ابتدایی هضم نشاسته‌ها در شرایط روده شبیه‌سازی‌شده رهایش یافت. میزان گلوکز رهایش یافته برای نشاسته فسفریله ۶-۱۱٪ و برای نشاسته هیدروکسی پروپیله ۱۹-۱۶٪ کمتر از نشاسته طبیعی پس از هضم در شرایط روده شبیه‌سازی شده بود. جهت مدل‌سازی رهایش گلوکز با روش جدول جستجوی منطق فازی، ورودی‌های فازی برای هر نوع نشاسته شامل حجم، غلظت و زمان هضم در روده شبیه‌سازی‌شده تعیین شد که به ترتیب به ۳، ۳ و ۱۳ مجموعه فازی با تابع عضویت مثلثی تقسیم شدند. به علاوه یک خروجی (میزان گلوکز رهایش یافته در شرایط روده شبیه‌سازی‌شده) شامل ۳۴ مجموعه فازی طراحی شد. در این پژوهش سیستم استنتاج Mamdani به دلیل سادگی آن مورد استفاده قرار گرفت و همچنین، عملگر T-norm حداقل و تکنیک نافازی کننده درجه کشش مرکزیت بر هر قانون اعمال شد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از جدول جستجوی منطق فازی نشان داد که این روش توانایی بالایی ( $R^2 = ۰/۹۵۱-۰/۹۹۱$ ) در تخمین میزان گلوکز رهایش یافته از نشاسته‌های گندم حین هضم در شرایط روده شبیه‌سازی شده دارد.

واژه‌های کلیدی: نشاسته، هضم، رهایش گلوکز، مدل‌سازی، منطق فازی

\* نویسنده مسئول: a\_yousefi@ubonab.ac.ir

## ۱. مقدمه

مدل‌ها می‌توانند برای تعیین غذاهای مناسب برای بیماران مبتلا به دیابت مورد استفاده واقع گردند. از مهم‌ترین مدل‌های تئوریتیکی که برای آنالیز کمی تجزیه نشاسته براساس نمودار هضمی آن به کار برده شده است می‌توان به مدل‌های میکائلیس-منتن<sup>۶</sup>، آماتو<sup>۷</sup> و دوگلیبی<sup>۸</sup> اشاره نمود [۱۱].

امروزه محققین اذعان داشته‌اند که روش‌های بر پایه هوش مصنوعی می‌توانند قابلیت بالایی (سرعت بالا و دقت بالا) در مدل‌سازی فرایندهای مختلف داشته باشند. به طوری که این روش‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی مدل‌سازی نظیر رگرسیون‌های چندگانه و سطح پاسخ باشند. سیستم استنتاج فازی، سیستمی است که از تئوری مجموعه‌های فازی که ورودی‌هایی («ویژگی‌هایی» در قالب تقسیم‌بندی فازی) را به خروجی‌هایی («کلاس‌هایی» در قالب تقسیم‌بندی فازی) مرتبط می‌سازد.

اخیراً، سیستم‌های مدل‌سازی بر پایه محاسبه نرم به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی فرایندهای مرتبط با علوم پزشکی و دارویی به کار گرفته می‌شود. داس و همکاران [۱۲] بیان کرده‌اند که در خونریزی حاد غیروارسی بخش فوقانی دستگاه گوارش، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۹</sup> می‌توانند با دقت بالای ۸۰٪ خونریزی زخم‌های ایجادشده را پیش‌بینی نمایند. سانگ و وو [۱۳] با استفاده از شبکه عصبی فازی توانستند ۴ نوع بیماری دستگاه گوارش را تشخیص دهند. برای این منظور، آنها از ۶۵٪ از نمونه‌ها برای آموزش دادن و به ترتیب از ۱۵ و ۱۵٪ نمونه‌ها برای اعتبار سنجی و تست‌کردن سیستم مدل‌سازی استفاده کردند و توانستند با دقت ۹۵/۲٪ این بیماری‌ها را از همدیگر تشخیص دهند. به‌طور مشابه، در سال‌های اخیر از سیستم‌های استنتاج فازی مختلف در بررسی بیماری‌های گوناگون دستگاه گوارش و یا هضم برخی ترکیبات در دستگاه شبیه‌ساز شده از دستگاه گوارش با کارایی بالایی استفاده شده است [۱۴، ۱۵]. در پژوهشی نشان داده شد که اصلاح شیمیایی سوکسیله‌کردن، سبب هضم آرام نشاسته موز می‌گردد و جهت تخمین میزان

نشاسته یکی از مهم‌ترین منابع کربوهیدراتی در غذای بشر شناخته می‌شود. نشاسته نه تنها از نقطه نظر ایجادکنندگی بافت در غذا و همچنین خواص تکنولوژیکی آن مد نظر متخصصین غذا بوده است، بلکه از لحاظ تغذیه‌ای نیز همواره مورد توجه واقع شده است. در سیستم‌های غذایی، نشاسته و غذاهای بر پایه نشاسته را می‌توان برحسب قابلیت هضم آن‌ها تقسیم‌بندی نمود که این تقسیم‌بندی با اندیس قند خون<sup>۱</sup> در ارتباط است [۱]. پیش‌بینی و کنترل کردن میزان رهائش گلوکز از غذاهای حاوی نشاسته از مهم‌ترین موضوعات مورد بحث حوزه تغذیه و سلامت در سطح جهان می‌باشد [۲]. براساس رفتار هضم، نشاسته‌ها به سه دسته کلی نشاسته‌های با قابلیت هضم سریع<sup>۲</sup>، نشاسته‌های با قابلیت هضم کند<sup>۳</sup> و نشاسته‌های مقاوم<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. قسمت عمده نشاسته قابل هضم طی چند مرحله آنزیمی به واحدهای گلوکز تجزیه می‌شود. از آنجایی که آنزیم آلفا-آمیلاز موجود در بزاق در شرایط اسیدی معده غیرفعال می‌گردد، پس در فرایند تجزیه نشاسته در معده نقش بسیار ناچیزی دارد. قسمت عمده تجزیه نشاسته توسط آنزیم آمیلاز پانکراتیک و در محل روده کوچک انجام می‌گیرد [۳].

اصلاح نشاسته‌های طبیعی عموماً جهت جبران نواقص کاربردی این گونه نشاسته‌ها و بهبود خواص آنها انجام می‌پذیرد [۴-۶]. یکی از راه‌های این اصلاح، اصلاح شیمیایی نشاسته می‌باشد که بر روی قابلیت هضم نشاسته نیز اثرگذار است [۷]. بیشتر تحقیقات نشان داده‌اند که فسفریله‌کردن (ایجاد اتصالات عرضی)، هیدروکسی‌پروپیل‌کردن، استیل‌کردن و اکسیدکردن نشاسته‌های طبیعی سبب افزایش محتوای نشاسته مقاوم می‌گردد [۸-۱۰]. تحقیقات مختلفی رابطه منطقی بین میزان تجزیه درون-شیشه‌ای<sup>۵</sup> نشاسته با شاخص قند خون را نشان داده‌اند. مدل‌هایی که می‌توانند دقت بالایی رفتار این نوع تجزیه را نشان دهند می‌توانند جهت تخمین میزان رهائش گلوکز نیز به کار برده شوند. این

6. Michaelis-Menten  
7. Amato  
8. Duggleby  
9. Artificial neural networks

1. Glycemic index  
2. Rapidly digestible starch  
3. Slowly digestible starch  
4. Resistant starch  
5. In vitro

به صورت سوسپانسیون تهیه شد. سپس ۱۰ ml پروپیلن اکسید به مخلوط اضافه گردید و فوراً ظرف به شدت همزده شد. پس از این مرحله pH مخلوط تهیه شده به وسیله سود ۱ نرمال بر روی ۱۱/۵ تنظیم شد و سپس به مدت ۴۰ h در دمای ۴۰ °C با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه در انکوباتور شیکر دار همزده شد. پس از پایان این مرحله pH مخلوط همزده شده، به وسیله اسیدکلریدریک ۱ نرمال به حدود ۶-۷ رسانیده شد و سپس مخلوط حاصله سه بار به وسیله آب مقطر (هر بار ۵۰۰ ml) شسته شد و در نهایت در دمای ۴۰ °C به مدت یک شبانه روز در آون خشک گردید [۱۰].

### ۳.۲. تولید نشاسته فسفریله گندم

ابتدا ۱۰۰ gr از نشاسته گندم در ۱۴۰ ml آب مقطر به صورت سوسپانسیون تهیه شد. سپس مخلوط سدیم تری متافسفات (STMP) و سدیم تری پلی فسفات (STPP) (۹۹/۱٪ وزنی/وزنی، ۴ gr) و در نهایت سولفات سدیم (۱۰ gr) به این مخلوط اضافه شده و pH نهایی مخلوط به وسیله سود ۱ نرمال بر روی ۱۱/۵ تنظیم شد. این مخلوط در دمای ۴۵ °C به مدت ۳ h و با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه در انکوباتور شیکردار همزده شد. پس از پایان این مرحله pH مخلوط همزده شده به وسیله اسیدکلریدریک ۱ نرمال به حدود ۶/۵ رسانیده شد و سپس مخلوط حاصله سه بار به وسیله آب مقطر (هر بار ۵۰۰ ml) شسته شد و در نهایت در دمای ۴۰ °C به مدت یک شبانه روز در آون خشک گردید [۱۰].

### ۴.۲. تعیین درجه جایگزینی هیدروکسی پروپیل در

#### نشاسته هیدروکسی پروپیل گندم

ابتدا ۱۰۰ mgr نشاسته هیدروکسی پروپیل در یک فلاکس حجمی ۵۰ میلی لیتری وزن شد و اسیدسولفوریک رقیق (۲۵ ml، ۱M) به آن اضافه گردید. مخلوط حاصله در حمام آب جوش قرار گرفت تا نشاسته آن حل شود و سپس سرد گردید و به وسیله آب مقطر به حجم رسانیده شد. یک میلی لیتر از محلول به دست آمده به فلاکس حجمی ۲۵ ml درباردار منتقل شد. سپس فلاکس در آب سرد قرار گرفت و

رهایش گلوکز از این نشاسته اصلاح شده حین هضم از روش های مدل سازی سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و حداقل مربعات جرئی با کارایی بالا استفاده شد [۱۶]. به طور مشابه، میزان نشاسته مقاوم مربوط به نشاسته سوکسینات انیدرید شده با روش های سطح پاسخ (طرح باکس-بنکن) و روش تلفیقی الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالایی ( $R^2 > 0.97$ ) تخمین زده شد [۱۷].

بر اساس بررسی منابع صورت گرفته تاکنون از روش مدل سازی جدول جستجوی منطق فازی بر تعیین میزان رهایش گلوکز از نشاسته های طبیعی و اصلاح شده در سیستم شبیه سازی شده دستگاه گوارش استفاده نشده است؛ لذا، در این پژوهش ضمن بررسی اثر اصلاح شیمیایی نشاسته گندم (فسفریله کردن و هیدروکسی پروپیل کردن) بر میزان رهایش گلوکز در سیستم شبیه سازی شده دستگاه گوارش، کارایی روش مدل سازی جدول جستجوی منطق فازی در تخمین میزان رهایش گلوکز نیز مورد بررسی واقع شد.

## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. مواد مورد استفاده

نشاسته طبیعی گندم، هیدروکسیدسدیم، اتانول، اسیدکلریدریک غلیظ، اسیدسولفوریک غلیظ، اسیدپرکلریک، اسیدنیتریک، معرف نینهدرین، پروپیلن گلیکول، مولبیدات آمونیوم، پتاسیم دی هیدروژن ارتوفسفات، برومیدپتاسیم، استات سدیم، ۳،۵- دی نیتروسالسیلیک اسید، گلوکز، سدیم پتاسیم تارتارات، سولفات سدیم، پروپیلن اکسید، سدیم تری متافسفات (STMP)، سدیم تری پلی فسفات (STPP)، آنزیم آلفا آمیلاز، آنزیم پپسین، آنزیم پانکراتین، آنزیم آمیلوگلوکوزیداز و آنزیم اینورتاز از شرکت های سیگما، مرک و شارلو خریداری شدند. نشاسته های هیدروکسی- پروپیل و فسفریله مورد استفاده در آزمایشگاه تولید شدند. همچنین بزاق مورد استفاده از یک اهداکننده سالم جمع آوری گردید.

### ۲.۲. تولید نشاسته هیدروکسی پروپیل گندم

ابتدا ۱۰۰ gr از نشاسته گندم در ۱۵۰ ml آب مقطر

آمونیم مولیبدات تهیه گردید. جذب نمونه‌ها در ۴۹۰ nm با استفاده از اسپکتروفتومتر تعیین شد. منحنی استاندارد با استفاده از جذب رقت‌های مختلف پتاسیم دی‌هیدروژن‌ارتوفسفات تهیه شد. در نهایت میزان درجه جایگزینی فسفر با استفاده از معادله (۲) تعیین گردید:

$$DS = \frac{162 \times P}{3100 - (102 \times P)} \quad (2)$$

که DS درجه جایگزینی، P درصد محتوای فسفر (بر اساس وزن خشک) نشاسته فسفریله شده می‌باشد.

## ۶.۲. تهیه ژل‌های نشاسته

برای تهیه ژل‌های نشاسته، سوسپانسیون‌های ۸ و ۱۲٪ نشاسته در آب مقطر تهیه شدند و جهت تهیه ژل، هر یک از سوسپانسیون‌ها بر روی دستگاه همزن مغناطیسی با قابلیت تنظیم دما، در دمای ۱۰۰ °C به مدت ۲۰ min حرارت داده شدند. سپس نمونه‌ها تا دمای اتاق سرد شده و ژل‌های به‌دست‌آمده مورد آزمایش‌های لازم قرار گرفتند.

## ۷.۲. جمع‌آوری بزاق

بزاق مورد استفاده در آزمایش‌ها به‌صورت تازه و قبل از هر آزمون براساس روش یوسفی و رضوی [۲۰] از یک اهداکننده سالم جمع‌آوری گردید. ابتدا جهت حذف ذرات موجود در دهان اهداکننده از او خواسته شد سه بار دهان خود را آب‌کشی کند. سپس جهت تحریک ترشح بزاق از او خواسته شد که یک صفحه نایلونی تمیز (با ابعاد حدود ۵×۵ cm<sup>2</sup>) را چند بار بجود و بعد بزاق ترشح‌شده و جمع‌شده در دهانش را به درون یک بشر تمیز بریزد. بزاق‌ها در دمای اتاق نگهداری شدند تا در همان روز مورد استفاده قرار بگیرند.

## ۸.۲. مدل‌های هضم دهانی و معدوی-رودوی درون شیشه‌ای

برای شبیه‌سازی مدل هضم دهانی، نمونه‌های پخته‌شده‌ی نشاسته‌های طبیعی و اصلاح‌شده گندم که در دو حجم (۷/۵ و ۱۵ ml) و دو غلظت (۸ و ۱۲٪) تهیه شده بودند درون یک بشر ۵۰ ml قرار گرفتند. سپس ۲ ml از بزاق

۸ ml اسیدسولفوریک غلیظ قطره قطره به آن اضافه گردید، در حالی که محلول همزده می‌شد. سپس فلاکس‌ها دقیقاً ۳ min در حمام آب جوش قرار گرفتند و پس از آن به یخچال منتقل شدند تا کاملاً سرد شوند. سپس ۰/۶ ml معرف نینهیدرین (۳٪ نینهیدرین در ۵٪ سدیم بی سولفیت) به آرامی به فلاکس‌ها اضافه و همزده شدند و سپس فلاکس‌ها به مدت ۱۰۰ min در حمام آب ۲۵ °C قرار گرفتند. در مرحله بعد محلول‌ها به‌وسیله اسیدسولفوریک غلیظ به حجم رسانیده شده و بدون اینکه همزده شوند، چند بار سر و ته شدند. آنگاه پس از ۵ min جذب محلول‌ها در طول موج ۵۹۰ nm اندازه‌گیری شد و از نشاسته طبیعی گندم به‌عنوان شاهد آزمون استفاده گردید. از محلول پروپیل‌گلیکول در محدوده ۵۰-۱۰۰ µgr/ml جهت تهیه نمودار استاندارد استفاده شد. از فاکتور ۰/۷۷۶۳ برای تبدیل وزن پروپیل‌گلیکول به عامل هیدروکسی پروپیل استفاده گردید. درصد عامل هیدروکسی پروپیل از معادله (۱) به دست آمد [۱۸]:

$$\%HP = \frac{C \times 0.7763 \times 50}{W \times 10} \quad (1)$$

HP = میزان استخلاف هیدروکسی پروپیل  
C = میزان پروپیل‌گلیکول در محلول نمونه به‌دست‌آمده از نمودار استاندارد (µgr)  
W = وزن نمونه (mgr)

## ۵.۲. تعیین درجه جایگزینی فسفر در نشاسته فسفریله شده

میزان فسفر موجود در نشاسته فسفریله با استفاده از روش رنگ سنجی، در نتیجه‌ی واکنش با آمونیم مولیبدات مطابق با روش جکسون [۱۹] تعیین شد. در ابتدا ۱ gr از نمونه‌های نشاسته با ۱۵ ml از مخلوط سه اسید نیتریک-اسید، پرکلریک-اسید و سولفوریک-اسید (با نسبت‌های به ترتیب از چپ به راست ۱:۴:۱۰) هضم شدند. بعد از شفاف شدن رنگ، نمونه‌ها به یک فلاکس ۵۰ ml استاندارد منتقل شدند و با ۱۰ ml آب مقطر رقیق گردیدند. سپس ۵ ml معرف آمونیم مولیبدات به فلاکس‌ها اضافه گردید و با آب مقطر به حجم رسانیده شد. نمونه شاهد نیز با استفاده از ۵ ml معرف

میزان قندهای احیاکننده آماده گردیدند.

## ۹.۲. تعیین میزان گلوکز رهایش یافته

برای جلوگیری از هیدرولیز آنزیمی بیشتر، مقادیر جداشده از نمونه ها در زمان های ذکر شده به سرعت با ۲/۵ ml اتانول مخلوط شدند. این مخلوط برای ۳۰ min در دمای اتاق ( $24 \pm 1^\circ \text{C}$ ) نگهداری شد. سپس برای اینکه تمام قندهای تولیدی در اثر هیدرولیز نشاسته ها به گلوکز تبدیل گردند، ۰/۱ ml از مخلوط ها جدا شد و در دمای  $37^\circ \text{C}$  (در اینکوباتور) برای ۱۰ min با ترکیبی از آنزیم های اینورتاز و آمیلوگلوکوزیداز که در بافر استات با pH ۵/۲ قرار داشتند ( $1 \text{ mgr}$  آمیلوگلوکوزیداز و  $0/4 \text{ mgr}$  اینورتاز به ازای هر ۱۰ ml بافر) مخلوط گردید. در انتها میزان قند گلوکز با استفاده از روش ۳،۵-دی نیتروسالسیلیک اسید اندازه گیری شد و به صورت میلی گرم گلوکز بر ۱۰۰ ml از مخلوط هضم شده گزارش گردید.

## ۱۰.۲. تعیین میزان قند به روش ۳،۵-دی نیتروسالسیلیک اسید

براساس این روش ابتدا دو محلول (الف) ۴۵ gr سدیم پتاسیم تارتارات در ۷۵ ml آب مقطر و (ب) ۱/۵ gr ۳،۵-دی نیتروسالسیلیک اسید در ۳۰ ml محلول ۲ M سود سوزآور، تهیه شدند. سپس دو محلول ذکر شده (الف) و (ب) با هم مخلوط شدند و حجم نهایی به وسیله آب مقطر به ۱۵۰ ml رسانیده شد. این محلول نهایی تهیه شده را معرف ۳،۵-دی نیتروسالسیلیک اسید می نامند. سپس  $250 \text{ mgr}$  گلوکز در آب مقطر حل گردید و حجم نهایی آن به ۱۰۰ ml رسانیده شد. ۱۰ ml از این محلول برداشته شد و حجم نهایی آن به ۱۰۰ ml رسانیده شد. محلول هایی به حجم های ۰ تا ۲ ml از این محلول به وسیله پیت برداشته شد و به وسیله آب مقطر حجم تمام آن ها به ۲ ml رسید. در ادامه ۱ ml از معرف ۳،۵-دی نیتروسالسیلیک اسید به تیوب های حاوی محلول گلوکز اضافه گردید و به خوبی همزده شد و برای جلوگیری از خروج آب در اثر تبخیر تمام تیوب ها درگذاری شدند. سپس تیوب های حاوی محلول ها به مدت

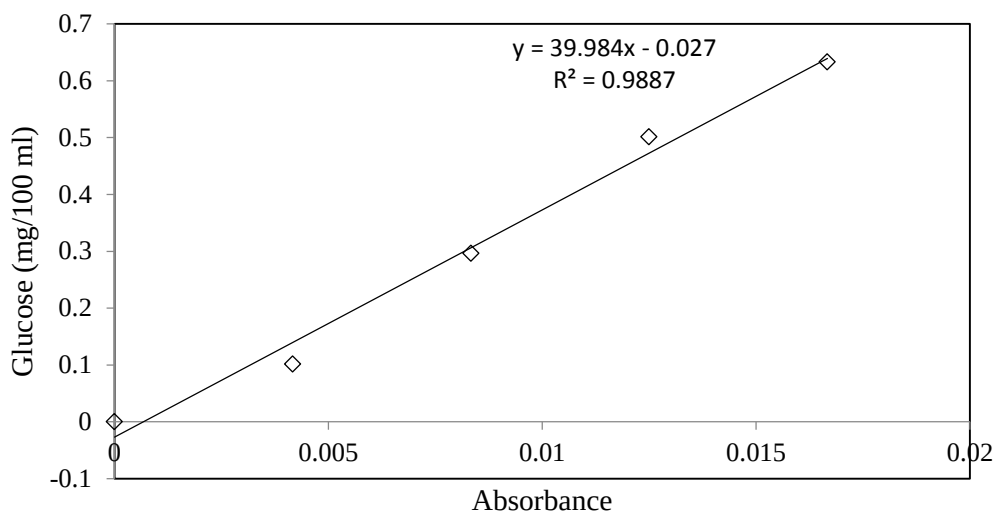
تازه ای جمع آوری شده بر روی هر نمونه ریخته شد و به وسیله یک میله شیشه ای با سرعت یک سیکل بر ثانیه و به مدت ۵ s همزده شد. مخلوط های نشاسته-بزاقت تهیه شده جهت بررسی مرحله هضم معده ای-روده ای سریعاً وارد یک سیستم مدل دومرحله ای هضم (به ترتیب معده ای و روده ای) شدند. شیر معده (SGF)<sup>۱</sup> و روده (SIF)<sup>۲</sup> شبیه سازی شده مورد استفاده براساس روش بیان شده توسط موسسه تحقیقات دارویی آمریکا که در تحقیق دارتوئیس و همکاران [۳] آورده شده بود تهیه شدند. مخلوط های نشاسته-بزاقت تهیه شده در مرحله اول درون لوله های فالكون ۳۰ ml ریخته شدند و سپس بر روی یک دستگاه همزن غلتکی که با سرعت ۶۰ دور در دقیقه در حال چرخش بود و درون یک اینکوباتور با دمای  $37^\circ \text{C}$  قرار داشت جاسازی گردیدند. نمونه های نشاسته ها برای ۴۰ min در ۱/۲ ml از شیر معده شبیه سازی شده (SGF) شامل آنزیم پپسین ( $1/765$  به ۱۰۰، وزنی/وزنی برحسب وزن خشک، آنزیم پپسین به نشاسته) و در pH  $1/2 \pm 0/05$  هضم گردیدند. pH مخلوط حاصله به طور مرتب هر ۵ min یکبار چک می شد تا در محدوده ذکر شده باشد. پس از مرحله هضم معده ای، pH مخلوط به وسیله سود ۱ M به ۶/۸ رسانیده شد تا از اثر بیشتر آنزیم پپسین جلوگیری شود.

برای شبیه سازی مرحله هضم روده ای، ۱/۴۵ ml از شیر روده شبیه سازی شده (SIF) شامل پانکراتین، اینورتاز و آمیلوگلوکوزیداز با نسبت آنزیم به نشاسته (برحسب وزن خشک) به ترتیب ۱/۳ به ۱۰۰، ۱/۱ به ۱۰۰۰ و ۱ به ۱۰۰۰ (وزنی/وزنی) به لوله های فالكون اضافه گردید. مرحله هضم روده ای برای ۱۲۰ min ادامه یافت در حالتی که مخلوط های به دست آمده در pH  $6/8 \pm 0/05$  و در دمای  $37^\circ \text{C}$  با سرعت ۶۰ دور در دقیقه همزده شدند.

مقادیر یکسانی (۰/۵ ml) از نمونه های در حال هضم در شرایط معده شبیه سازی شده در دقایق ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ و از نمونه های در حال هضم در شرایط روده شبیه سازی شده در دقایق ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ جدا شدند و برای آزمون تعیین

1. Simulated gastric fluid  
2. Simulated intestinal fluid

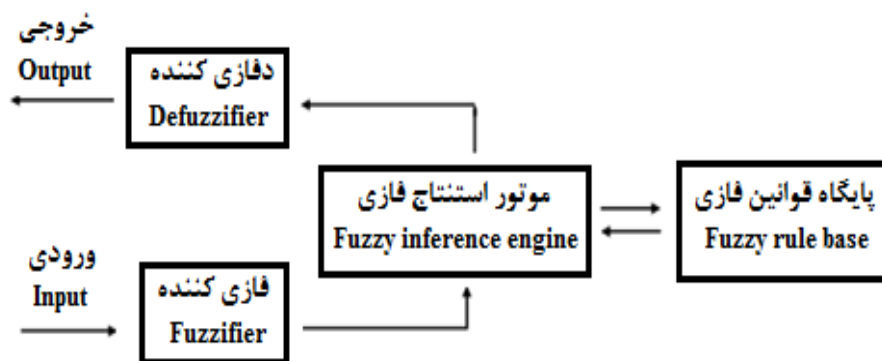
شکل (۱) نمودار استاندارد به‌دست‌آمده براساس روش اندازه‌گیری قندهای احیای ۵،۳-دی نیتروسالسیلیک‌اسید را نشان می‌دهد. پس از این مرحله تیوب‌ها تا رسیدن به دمای اتاق سرد شدند و جذب آن‌ها در طول موج ۵۴۰ nm در برابر نمونه شاهد ثبت گردید [۲].



شکل (۱) منحنی استاندارد غلظت گلوکز در برابر جذب خوانده‌شده در طول موج ۵۴۰ nm

Fig 1. Standard curve of glucose concentration vs. absorbance at 540 nm.

۱۱.۲ مدل‌سازی فازی  
دارای چهار قسمت اصلی شامل فازی‌کننده<sup>۱</sup>، پایگاه قوانین فازی<sup>۲</sup>، موتور استنتاج فازی<sup>۳</sup> و دِفَازی‌کننده<sup>۴</sup> می‌باشد. ساختار عمومی سیستم استنتاج فازی در شکل (۲) نشان داده شده است. به‌طور خلاصه یک سیستم استنتاج فازی



شکل (۲) ساختار عمومی یک سیستم استنتاج فازی

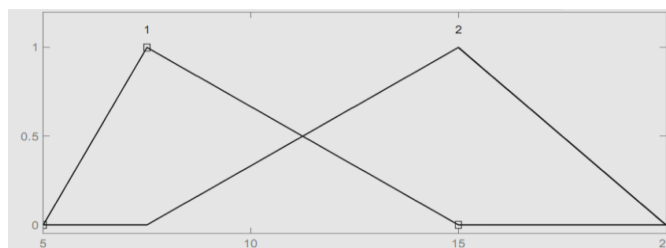
Fig 2. General structure of a fuzzy inference system.

1. Fuzzifier
2. Fuzzy Rule Base
3. Fuzzy Inference Engine
4. Defuzzifier

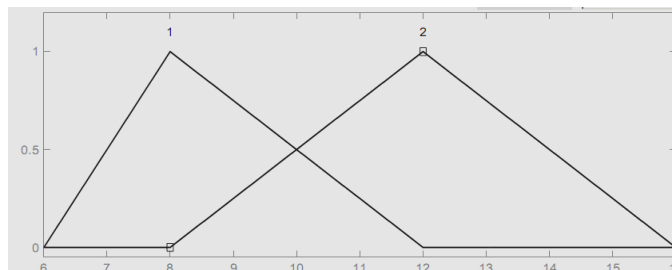
میزان رهایش گلوکز در روده شبیه‌سازی شده استفاده شد. برای دستیابی به این مهم مراحل زیر تحت نرم‌افزار برنامه‌نویسی مطلب ۷ و جعبه ابزار منطق فازی<sup>۱</sup> انجام پذیرفت.

**مرحله اول)** تعریف کردن مجموعه‌های فازی به طوری که تمام فضای ورودی و خروجی داده‌ها را پوشاند: ورودی‌های فازی برای هر نوع نشاسته شامل حجم، غلظت و زمان هضم در روده شبیه‌سازی شده بود که به ترتیب به ۳، ۳ و ۱۳ مجموعه فازی تقسیم شدند. به علاوه یک خروجی (میزان گلوکز رهایش یافته در شرایط روده شبیه‌سازی شده) شامل ۳۴ مجموعه فازی طراحی شد (شکل ۳).

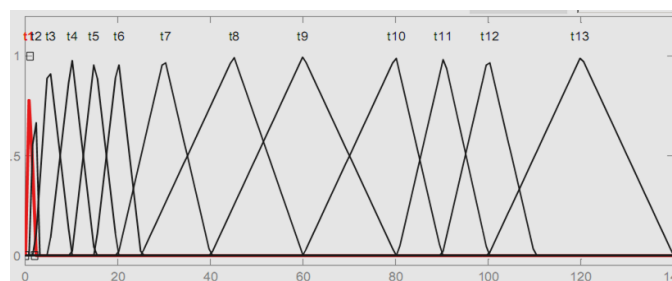
فازی کننده داده‌های ورودی را به درجه‌ای از عضویت تبدیل می‌کند که این عمل با جستجو در یک یا چند تابع عضویت مختلف صورت می‌گیرد. به جای تعلق کامل یک مقدار ورودی به یک مجموعه، در سیستم منطق فازی تعلق نسبی ورودی‌ها به هر یک از زیرمجموعه‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. یک تابع عضویت به صورت یک عدد بین ۰ و ۱، میزان تعلق نسبی یک مقدار ورودی به زیر مجموعه‌ها را بیان می‌کند. توابع عضویت را به صورت‌های مختلفی می‌توان نشان داد، ولی معمولاً برای کارهای آزمایشگاهی و کاربردی مدل‌های خطی آن مانند توابع مثلثی بسیار پرکاربردتر است که در این تحقیق نیز، این شکل از تابع عضویت به کار برده شد. در این پژوهش از جدول جستجوی فازی برای تخمین



(a)



(b)



(c)



(d)

شکل (۳) توابع عضویت مربوط به ورودی‌های (a) حجم، (b) غلظت، (c) زمان هضم و (d) خروجی رهایش گلوکز

Fig 3. Membership functions related to the inputs of (a) volume, (b) concentration, (c) digestion time; and output of (d) glucose release

قانون،  $x_i^p$  و  $y^p$  به ترتیب  $i$ -امین ورودی از  $p$ -امین قانون و  $p$ -امین قانون از متغیر خروجی می‌باشند. مقدار درجه قانون از ۰ تا ۱ متغیر است.

**مرحله چهارم)** ایجاد پایگاه قوانین فازی: با نوشتن مجزای هر قانون در نهایت پایگاه قوانین فازی تشکیل شد. در این پژوهش سیستم استنتاج Mamdani به دلیل سادگی آن مورد استفاده قرار گرفت. به علاوه عملگر T-norm حداقل<sup>۳</sup> (رابطه (۵)) و تکنیک نافازی کننده درجه کشش مرکزیت<sup>۴</sup> بر هر قانون اعمال شد.

$$T_{\min}(a, b) = \min(a, b) = a \wedge b \quad (5)$$

نافازی کننده درجه کشش مرکزیت میزان  $y^*$  را به عنوان مرکز سطح پوشش داده شده با تابع عضویت  $B'$  معرفی می‌کند که مقدار آن از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$y^* = \frac{\int_v y \mu_{B'}(y) dy}{\int_v \mu_{B'}(y) dy} \quad (6)$$

که  $\int_v$  یک انتگرال قراردادی است [۲۱].

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. درجه جایگزینی هیدروکسی پروپیل و فسفر در

**مرحله دوم)** تولید یک قانون فازی به صورت ترکیبی از ورودی‌ها و خروجی: رابطه (۳) نشان می‌دهد که جفت‌های ورودی-خروجی به وسیله یک قانون فازی قابل تولید شدن هستند.

$$(x_1^p, x_2^p, x_3^p, y_1^p) \Rightarrow IF - THEN \text{ rules } p = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

که  $x_1$  تا  $x_3$  متغیرهای ورودی و  $y$  متغیر خروجی و  $p$  تعداد جفت‌های ورودی-خروجی می‌باشد. برای جلوگیری از اثر همپوشانی مجموعه‌ها، متغیرها به توابع عضویتی متناسب شدند که درجه عضویت بالاتری را تولید می‌کردند.

**مرحله سوم)** محاسبه درجه قوانین فازی ایجاد شده در مرحله دوم: در برخی از موارد قانون‌های ناسازگاری ایجاد می‌شود که باید با اعمال درجه قانون، ناسازگاری ایجاد شده را برطرف کرد. قوانین ناسازگار به قوانینی اطلاق می‌شود که در آن قانون‌ها قسمت مقدم<sup>۱</sup> قانون که شامل IF می‌باشد یک عبارت مشترک بوده در حالی که قسمت تالی<sup>۲</sup> که شامل THEN می‌باشد با یکدیگر تفاوت دارند. در این حالت با به دست آوردن درجه قانون مطابق با رابطه (۴)، قانون دارای بالاترین درجه حفظ و مابقی قوانین ناسازگار حذف می‌شوند.

$$D(\text{rule}) = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i'} * (x_i^p) \mu_{B_i'} * (y^p) \quad (4)$$

در این رابطه  $A_i^j$ ،  $j$ -امین تابع عضویت  $i$ -امین ورودی،  $B$  قانون خروجی،  $i$  یعنی  $i$ -امین خروجی مدل،  $p$  شاخص

3. Minimum  
4. Center of gravity defuzzifier

1. Antecedent  
2. Consequent



### نشاسته هیدروکسی پروپیل و فسفریله گندم

میزان محتوای هر نوع استخلاف شیمیایی اعمال شده در نشاسته های اصلاح شده، تأثیر زیادی بر خواص آن نشاسته می گذارد، به طوری که با تغییر درصد یک نوع استخلاف شیمیایی بر روی یک نوع نشاسته خاص ممکن است خصوصیات متفاوتی قابل مشاهده باشد [۴]. از این رو میزان محتوای گروه هیدروکسی پروپیل و فسفر در نشاسته های هیدروکسی پروپیل و فسفریله گندم با استفاده از روش های ذکر شده تعیین شد که میزان آن به ترتیب ۲/۱۰۶ و ۰/۰۹۶٪ (DS = ۰/۰۱) بود. ون هانگ و موریتا [۲۲] از نشاسته های نوع A و B گندم جهت تولید نشاسته هیدروکسی پروپیل با به کار بردن روشی کمی متفاوت تر از آنچه در این تحقیق بیان شد، استفاده کردند. درجه جانشینی استخلاف به دست آمده توسط آنها برای این دو نوع نشاسته به ترتیب ۴/۷ و ۳/۸٪ بود. چانگ و همکاران [۱۰] در روشی مشابه، نشاسته های اصلاح شده هیدروکسی پروپیل و فسفریله ذرت معمولی تولید کردند. آنها میزان استخلاف جانشین شده را به ترتیب ۲/۰۹ و ۰/۱۴٪ بیان کردند. سانگ و همکاران [۲۳] نشاسته فسفریله گندم تولید کردند و اثر pH های قلیایی ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ را بر خصوصیات این نوع نشاسته بررسی کردند. در این تحقیق برای اندازه گیری درصد فسفر موجود در نشاسته های فسفریله شده از تکنیک  $^{31}\text{P}$  NMR استفاده شد و میزان محتوای فسفر را در pH خنثی ۰/۳۷٪ به دست آمد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که افزایش pH محیط حاوی نشاسته فسفریله شده سبب کاهش محتوای فسفر آن می شود، به طوری که در pH ۱۲، میزان محتوای فسفر ۰/۲۹٪ تعیین شد. چنین به نظر می رسد که تفاوت محتوای گروه های استخلاف شده بر روی نشاسته ها به تفاوت در روش تولید مانند تفاوت در نوع مواد اضافه شده، pH، دما و شرایط هم خوردن و همچنین تکنیک اندازه گیری میزان استخلاف ایجاد شده می باشد [۲۲].

### ۲.۳. میزان رهایش گلوکز در شرایط معده و روده شبیه سازی شده

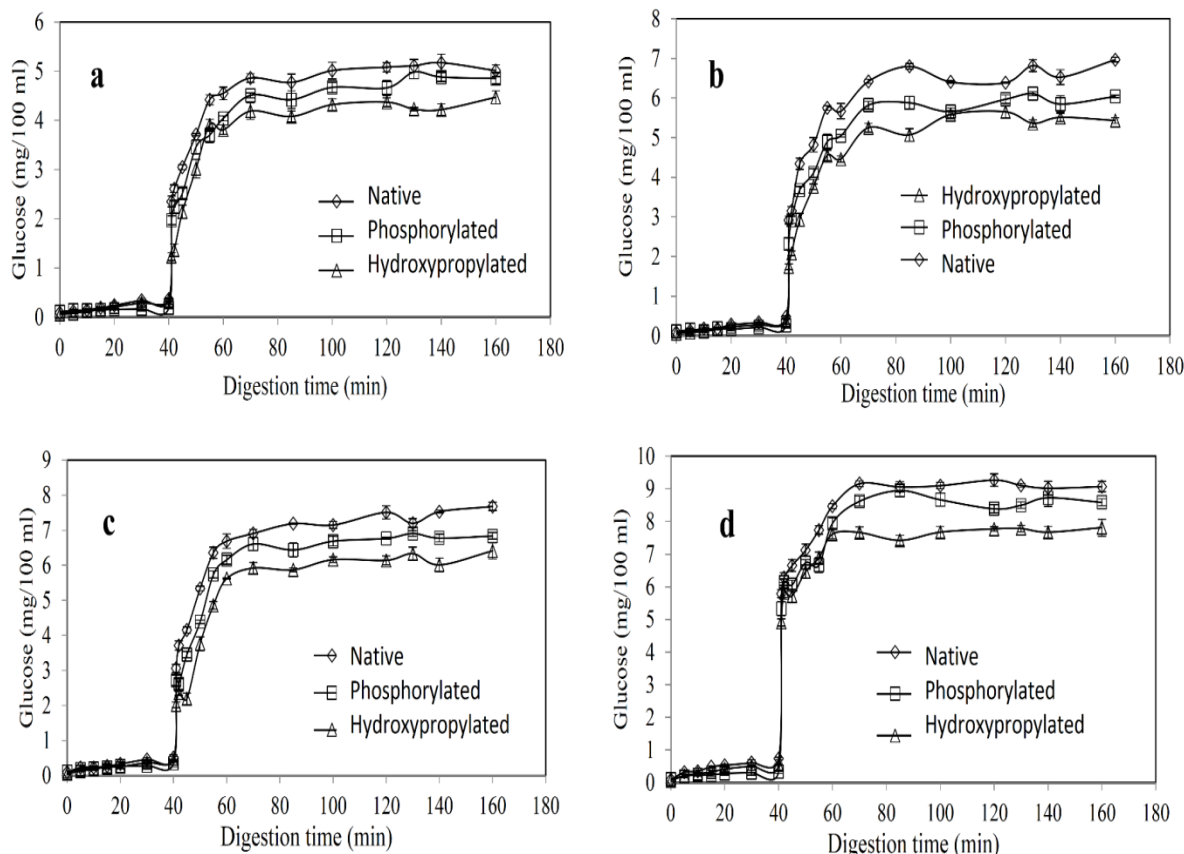
نتایج به دست آمده از هیدرولیز نمونه ژل نشاسته های مورد آزمایش در غلظت ها و حجم های مختلف در شکل (۴) نشان

داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است، میزان هیدرولیز نشاسته ها طی ۴۰ min فرایند هضم در شرایط اسیدی معده ناچیز است که دلیل این امر غیرفعال شدن آنزیم های هیدرولیز کننده موجود در بزاق به علت pH اسیدی معده (۱/۲) و عدم وجود آنزیم های هیدرولیز کننده نشاسته مقاوم به این شرایط می باشد. البته باید اذعان کرد که دلیل همین مقدار رهایش نیز هیدرولیز اسیدی نشاسته ها و اثر کم آنزیم های موجود در بزاق بوده است [۲]. نتایج مشابهی برای نشاسته اصلاح شده ذرت مومی [۲۴]، نشاسته ذرت مومی [۳] و نشاسته های سیب زمینی پخته شده گزارش شده است [۲]. اگر چه میزان گلوکز رهایش یافته از نشاسته طبیعی در این شرایط هضم بیشتر از نشاسته های فسفریله و هیدروکسی پروپیل بود، اما تفاوت معنادار آماری بین این نمونه ها مشاهده نشد ( $p > ۰/۰۵$ ). نتایج نشان داد که میزان رهایش گلوکز در شرایط معده شبیه سازی شده به طور معنی داری تحت تأثیر غلظت های استفاده شده بود ( $p < ۰/۰۵$ ) در حالی که این میزان تحت تأثیر حجم های مورد آزمایش واقع نشد ( $p > ۰/۰۵$ ).

همان طور که مشاهده می شود میزان رهایش گلوکز در شرایط هضم در روده شبیه سازی شده به شدت افزایش یافت که دلیل این مسئله وجود آنزیم های تجزیه کننده نشاسته شامل آمیلوگلوکوزیداز، اینورتاز و پانکراتین بود. براساس نتایج به دست آمده حدود ۸۵-۸۲، ۸۳-۷۴ و ۸۱-۷۷٪ از رهایش گلوکز به ترتیب برای نشاسته های طبیعی، فسفریله و هیدروکسی پروپیل در ۱۵ min اول هضم در روده صورت گرفت و تقریباً پس از آن هضم نشاسته ها متوقف شده و به تبع آن رهایش گلوکز متوقف شد. دارتوئیس و همکاران [۳] بیان کردند که حدود ۷۰٪ ژل نشاسته ذرت مومی در ۱۰ min اول هضم در روده صورت می گیرد. نتایج مشابهی توسط بوردولوی و همکاران [۲] در بررسی نحوه هضم نشاسته های موجود در سیب زمینی در شرایط هضم روده ای به دست آمد. در تمام غلظت ها و حجم های مورد آزمایش، میزان رهایش گلوکز از نشاسته طبیعی بیشتر از نشاسته فسفریله شده و نشاسته فسفریله بیشتر از نشاسته هیدروکسی پروپیل بود، به طوری که بیشترین مقدار رهایش گلوکز برای نمونه نشاسته طبیعی در حجم ۱۵ ml و غلظت

به دست آمده، افزایش ۱/۵ برابری (از ۸ به ۱۲٪) غلظت نشاسته‌ها نسبت به افزایش حجم ۲ برابری (از ۷/۵ ml به ۱۵ ml) اثر بیشتری بر میزان رهایش گلوکز نمونه‌های نشاسته داشت. دلیل این مسئله را می‌توان به استفاده بیشتر از یک میزان آنزیم موجود و درگیر در شرایط هضم برای نشاسته غلیظ‌تر نسبت به نشاسته پرحجم‌تر دانست.

۱۲٪ (۹/۲۷ mgr بر ۱۰۰ ml) و کمترین این مقدار برای نشاسته هیدروکسی پروپیل در حجم ۷/۵ و غلظت ۸٪ (۵/۱۷ mgr بر ۱۰۰ ml) به دست آمد. البته پرواضح است که وجود شاخه حجیم هیدروکسی پروپیل بر سر بسیاری از شاخه‌ها به عنوان یک مانع فیزیکی وجود دارد و به همین سبب این نشاسته حتی در شرایط هضم در روده دارای کمترین میزان رهایش گلوکز بود ( $p < 0.05$ ). براساس نتایج



شکل (۴) میزان رهایش گلوکز از نمونه‌های ژل نشاسته‌ها در شرایط هضم معده و روده شبیه‌سازی شده (a) غلظت ۸٪، حجم ۷/۵ ml، (b) غلظت ۸٪، حجم ۱۵ ml، (c) غلظت ۱۲٪، حجم ۷/۵ ml، (d) غلظت ۱۲٪، حجم ۱۵ ml.

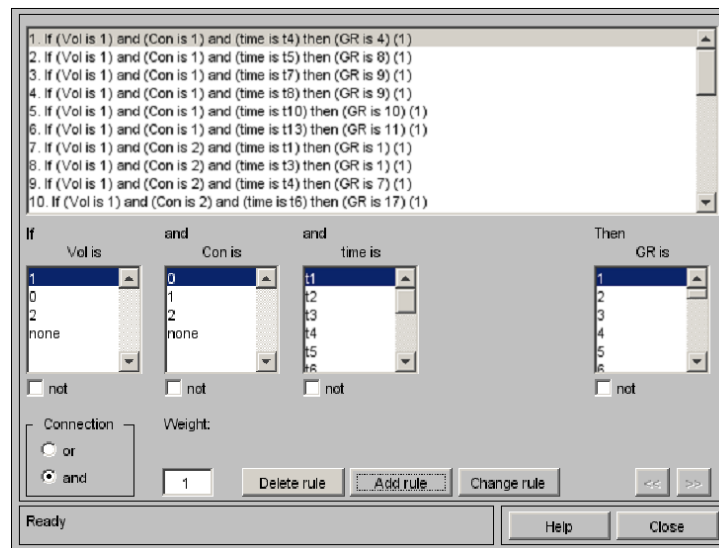
**Fig 4.** The amount of glucose release from starch gel samples under the simulated gastrointestinal digestion condition (a) 8% and 7.5 ml, (b) 8% and 15 ml, (c) 12% and 7.5 ml, (d) 12% and 15 ml.

فازی ممدانی و جدول جستجوی فازی، از ۶۰٪ داده‌ها جهت آموزش (نوشتن پایگاه قوانین فازی) و از ۴۰٪ بقیه برای تست کردن سیستم مدل‌سازی طراحی شده استفاده شد. شکل (۵) پایگاه قوانین فازی تشکیل شده جهت مدل‌سازی را نشان می‌دهد که توسط این قوانین (در مجموع ۳۱ قانون) ورودی‌ها به سیستم مدل معرفی شدند، به این صورت که

### ۳.۳. مدل‌سازی فازی

توابع عضویت ورودی‌ها (حجم، غلظت و زمان هضم) و خروجی (میزان رهایش گلوکز) سیستم مدل‌سازی فازی براساس جدول جستجوی فازی در بخش ۱۱.۲ نشان داده شد. برای مدل‌سازی رهایش گلوکز با استفاده سیستم استنتاج

یک مجموعه سه عضوی از ورودی ها (حجم، غلظت و زمان داده شد. هضم) به یک مقدار خروجی (میزان رهایش گلوکز) نسبت

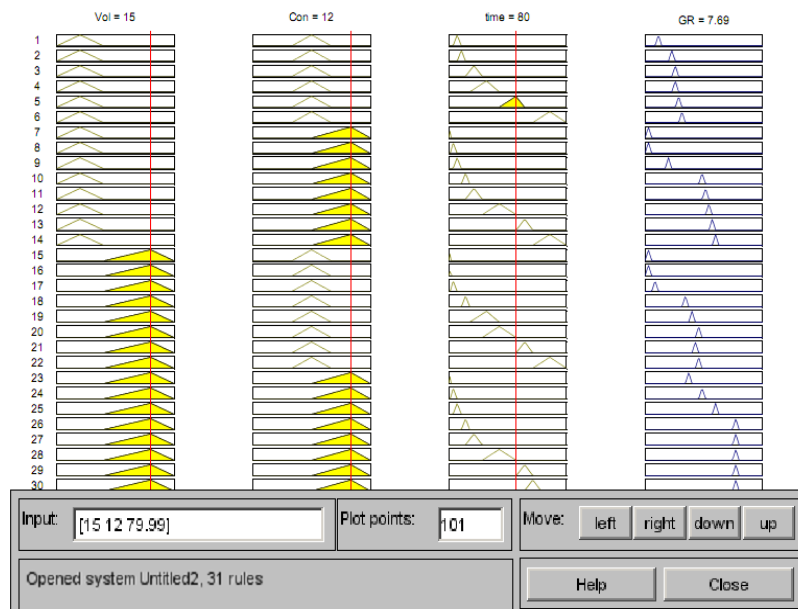


شکل (۵) پایگاه قوانین فازی تشکیل شده جهت مدل سازی

Fig 5. Fuzzy rule base developed for modeling.

با توجه به اینکه مجموعه قوانین ناسازگاری در پایگاه قوانین فازی به وجود نیامد، در نتیجه درجه تمام قوانین نوشته شده ۱ در نظر گرفته شد. در انتها در قسمت ناظر

قوانین<sup>۱</sup> داده های تست وارد شده و میزان رهایش گلوکز تخمین زده شده به دست آمد (شکل ۶).



شکل (۶) بخش ناظر قوانین استفاده شده جهت تخمین میزان خروجی داده های تست

Fig 6. Fuzzy rule viewer section used for estimation of the output related to the test data.

جدول (۱) کارایی سیستم مدل‌سازی جدول جستجوی منطق فازی به‌کاربرده شده جهت تخمین میزان گلوکز رهایش یافته در شرایط روده شبیه‌سازی شده

**Table 1.** Efficiency of fuzzy logic table look-up scheme modeling system applied for estimation of the amount of glucose release under the simulated intestinal condition.

| RMSE  | R <sup>2</sup> | نوع نشاسته<br>Starch type                          |
|-------|----------------|----------------------------------------------------|
| 0.134 | 0.993          | نشاسته طبیعی<br>Native starch                      |
| 0.101 | 0.995          | نشاسته فسفریله<br>Phosphorylated starch            |
| 0.123 | 0.992          | نشاسته هیدروکسی پروپیل<br>Hydroxypropylated starch |

رهایش گلوکز در شرایط روده شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت که نشاسته‌های هیدروکسی پروپیل و فسفریله به‌دلیل اینکه رهایش قند کمتری از آنها صورت می‌گیرد، می‌توانند در رژیم غذایی بیماران دیابتی و یا کسانی که به دنبال کاهش قند مصرفی هستند (مثلاً برای افراد چاق) مورد استفاده قرار گرفته و جایگزین استفاده از نشاسته طبیعی شوند. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش حجم و غلظت نشاسته مصرفی (خواه اصلاح‌شده یا طبیعی) می‌توان میزان رهایش گلوکز را کنترل کرد.

مدل‌سازی فازی با استفاده از جدول جستجوی فازی کارایی بالایی ( $R^2 = 0.992-0.995$ ) را در تخمین میزان رهایش گلوکز در شرایط روده شبیه‌سازی شده از خود نشان داد. این مسئله قابلیت بسیار خوب استفاده از روش‌های بر پایه هوش مصنوعی را برای چنین مدل‌سازی‌هایی به‌خوبی نشان می‌دهد. به‌دلیل اینکه مقدار داده‌های به‌دست‌آمده از برخی سیستم‌های شبیه‌سازی شده دستگاه گوارش محدود است، می‌توان گفت که از قدرت بالای حافظه انجمنی مدل‌سازی‌های بر پایه منطق فازی می‌توان جهت مدل‌سازی هر چه بهتر این سیستم‌ها استفاده کرد.

جدول (۱) نتایج مدل‌سازی به‌دست‌آمده را برای نشاسته‌های مختلف نشان می‌دهد. مقادیر بالای ضریب تبیین ( $R^2$ ) و پائین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که به ترتیب در محدوده ۰/۹۹۲-۰/۹۹۵ و ۰/۱۰۱-۰/۱۳۴ بودند، توانایی بالای این روش مدل‌سازی را جهت تخمین میزان گلوکز رهایش یافته در شرایط روده شبیه‌سازی شده نشان داد. اگرچه پژوهش خاصی در رابطه با مدل‌سازی فرایندهای درگیر با سیستم‌های دستگاه گوارش با استفاده از سیستم استنتاج فازی جهت مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق یافت نشد، اما تحقیقاتی که این قسمت آورده می‌شود به‌خوبی کارایی بالای سیستم فازی را جهت مدل‌سازی فرایندهای مختلف مرتبط با صنایع غذایی را نشان می‌دهد [۲۷-۲۵].

#### ۴. نتیجه‌گیری

براساس نتایج به‌دست‌آمده شرایط هضم معدوی شبیه‌سازی شده تأثیر چندانی بر روی میزان رهایش گلوکز نداشت، در حالی که افزایش شدیدی در این میزان تحت تأثیر آنزیم‌های هیدرولیز کننده نشاسته در شرایط روده شبیه‌سازی شده مشاهده گردید. براساس نتایج به‌دست‌آمده برای میزان

#### منابع

- [1] Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. *Trends Food Sci. Technol.*, 21(4), 168-180.  
[2] Bordoloi, A., Singh, J., & Kaur, L. (2012). *In vitro* digestibility of starch in cooked potatoes as affected

- by guar gum: microstructural and rheological characteristics. *Food Chem.*, 133(4), 1206-1213.  
[3] Dartois, A., Singh, J., Kaur, L., & Singh, H. (2010). Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility-rheological and microstructural



characteristics. *Food Biophys.*, 5(3), 149–160.

- [4] Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—a review. *Food Hydrocoll.*, 21(1), 1–22.
- [5] Yousefi, A., & Razavi, S.M.A. (2015). Dynamic rheological properties of wheat starch gels as affected by chemical modification and concentration. *Starch-Stärke*, 67(7-8), 567–576.
- [6] Yousefi, A., Razavi, & S.M.A. (2015). Steady shear flow behavior and thixotropy of wheat starch gel: impact of chemical modification, concentration and saliva addition. *J. Food Process Eng.*, 39(1), 31–43.
- [7] Han, J.-A., & BeMiller, J.N. (2007). Preparation and physical characteristics of slowly digesting modified food starches. *Carbohydr. Polym.*, 67(3), 366–374.
- [8] Wolf, B.W., Bauer, L.L., & Fahey, G.C. (1999). Effects of chemical modification on in vitro rate and extent of food starch digestion: an attempt to discover a slowly digested starch. *J. Agric. Food Chem.*, (47), 4178–4183.
- [9] Koo, S.H., Lee, K.Y., Lee, H.G. (2010). Effect of cross-linking on the physicochemical and physiological properties of corn starch. *Food Hydrocoll.*, 24(6), 619–625.
- [10] Chung, H.-J., Shin, D.-H., & Lim, S.-T. (2008). In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Res. Int.* 41(6), 579–585.
- [11] Nguyen, G. T., & Sopade, P. A. (2018). Modeling starch digestograms: Computational characteristics of kinetic models for in vitro starch digestion in food research. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 17(5), 1422-1445.
- [12] Das, A., Ben-Menachem, T., Farooq, F.T., Cooper, G.S., Chak, A., Sivak, M.V., & Wong, R.C. (2008). Artificial neural network as a predictive instrument in patients with acute nonvariceal upper gastrointestinal hemorrhage. *Gastroenterology*, 134, 65–74.
- [13] Song, W., & Wu, Y. (2017). Application of Fuzzy Neural Network in Diagnosis of Gastrointestinal System Diseases. *Adv. Eng. Res.*, 130, 1454-1458.
- [14] Al-Kasasbeh, R., Korenevskiy, N., Alshamasin, M., Ionescou, F., & Smith, A. (2013). Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, 16(3), 302-313.
- [15] Maldonado-Valderrama, J., Terriza, J. H., Torcello-Gómez, A., & Cabrerizo-Vilchez, M. A. (2013). In vitro digestion of interfacial protein structures. *Soft Matter*, 9(4), 1043-1053.
- [16] Olawoye, B., Fagbohun, O. F., Gbadamosi, S. O., & Akanbi, C. T. (2020). Succinylation improves the slowly digestible starch fraction of cardaba banana starch. A process parameter optimization study. *Artif. Intell. Agric.*, 4, 219-228.
- [17] Olawoye, B., Gbadamosi, S. O., Otemuyiwa, I. O., & Akanbi, C. T. (2020). Improving the resistant starch in succinate anhydride - modified cardaba banana starch: A chemometrics approach. *J. Food Process. Preserv.*, 44(9), e14686.
- [18] Johnson, D.P. (1969). Spectrophotometric determination of the hydroxypropyl group in starch ethers. *Anal. Chem.*, 41, 859–860.
- [19] Jackson, M.L. (1967). Soil Chemical Analysis, Ed. M.L. Jackson, Prentice Hall of India, Pvt. Ltd, New Delhi, 151-154.
- [20] Yousefi, A., & Razavi, S.M.A. (2016). Steady shear flow behavior and thixotropy of wheat starch gel: Impact of chemical modification, concentration and saliva addition. *J. Food Process Eng.*, 39(1), 31–43.
- [21] Wang, L.X. (1997). A course in fuzzy systems and control. Prentice-hall international, Inc, 153-167.
- [22] Hung, P.V., & Morita, N. (2005). Physicochemical properties of hydroxypropylated and cross-linked starches from A-type and B-type wheat starch granules. *Carbohydr. Polym.*, 59, 239-246.
- [23] Sang, Y., Seib, P.A., Herrera, A.I., Prakash, O., & Shi, Y.C. (2010). Effects of alkaline treatment on the structure of phosphorylated wheat starch and its digestibility. *Food Chem.*, 118, 323-327.
- [24] Sanz, T., & Luyten, H. (2006). Release, partitioning and stability of isoflavones from enriched custards during mouth, stomach and intestine in vitro simulations. *Food Hydrocoll.*, 20, 892-900.
- [25] Ioannou, I., Perrot, N., Curt, C., Mauris, G., & Trystram, G. (2004). Development of a control system using the fuzzy set theory applied to a browning process—a fuzzy symbolic approach for the measurement of product browning: development of a diagnosis model—part I. *J. Food Eng.*, 64, 497-506.
- [26] Vaquiro, H.A., Bon, J., & Diez, J. L. (2008). Fuzzy logic application to drying kinetics modeling. 17th IFAC World Congress, COEX, Korea, South, 2206-2211.
- [27] Khodabakhshaghdam, S., Yousefi, A., Mohebbi, M., Razavi, S.M.A., Orooji, A., & Akbarzadeh-Totonchi, M.R. (2015). Modeling for drying kinetics of papaya fruit using fuzzy logic table look-up scheme. *Int. Food Res. J.*, 22(3), 1234-1239.

### Research Article

## The use of fuzzy logic table look-up scheme for modeling of glucose release from wheat starches

Alireza Yousefi<sup>1\*</sup>, Shahla Khodabakhshaghdam<sup>2</sup>, Reza Saghafi<sup>3</sup>, Seyed M.A. Razavi<sup>4</sup>

1. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab

2. Ph.D., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab

3. Assistant Professor, Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab

4. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

### Abstract

In this study phosphorylated and hydroxypropylated wheat starches were produced with 0.096 and 2.106% degree of substitution, respectively. The gel samples of the starches were prepared with concentrations of 8% and 12% at volumes of 7.5 and 15 ml. The gel samples were subjected under digestion process at simulated mouth and gastrointestinal conditions. The results showed that about 80% of the final glucose release from the starch samples were obtained within the first 15 min of digestion at the simulated intestinal condition. The amounts of glucose release for phosphorylated starch were approximately 6-11%, and for hydroxypropylated starch were 16-19% lower than that for native wheat starch after digestion at this condition. Fuzzy logic table look-up scheme was used in order to model the amount of glucose release from the starch samples. The fuzzy inputs (volume, concentration and the digestion time under the simulated intestinal condition) for each sample comprised of respectively 3, 3 and 13 fuzzy sets with triangular membership functions. Moreover, the amount of glucose release with 34 fuzzy sets and triangular membership function was considered as the output of fuzzy modeling system. In this research, the Mamdani's inference system was used to conduct fuzzy set operations and the minimum T-norm operator and the center of gravity defuzzifier were used to produce each fuzzy rule. The results obtained from the fuzzy logic table look-up scheme modeling system demonstrated high proficiency ( $R^2 = 0.991-0.995$ ) of that for estimation of the amount of glucose release from the wheat starch samples at the simulated intestinal conditions.

**Keywords:** Starch, Digestion, Glucose release, Modeling, Fuzzy logic

---

\* Corresponding author: a\_yousefi@ubonab.ac.ir