

مدل‌سازی فضای درکی واکه‌ای در چارچوب نظریه فازی

نمونه مورد بررسی: فارسی معیار

شیرین‌زهرامه‌ت‌نیا^۱

کارشناس ارشد زبان‌شناسی همگانی دانشگاه الزهرا

مهدی غضنفری^۲

دانشگاه علم و صنعت ایران

ماندانا نوربخش^۳

دانشگاه الزهرا

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۶

چکیده

هدف مطالعه حاضر بررسی فضای واکه‌ای زبان فارسی معیار براساس نظریه فازی است که بر مبنای منطق چندارزشی شکل گرفته است و در آن درجه عضویت تعلق یک عنصر به مجموعه، نقشی برجسته ایفا می‌کند. در این جستار، با طراحی یک آزمایش، محرک‌های مصنوعی شش واکه فارسی معیار ساخته شدند و با تغییر فرکانس دو پارامتر $F1/F2$ ، فضای واکه‌ای مصنوعی ایجاد شد. در ادامه، محرک‌های مصنوعی طی یک مرحله آزمون درکی شناسایی به سنجش گذاشته شدند. هر محرک دو بار برای ۲۰ شرکت‌کننده (ده مرد و ده زن) پخش شد و مقادیر کمی سازه‌های اول و دوم استخراج و ثبت شد. نتایج حاصل از آزمون درکی حکایت از آن دارد که شرکت‌کنندگان در بازه‌ای از فرکانس‌های $F1$ و $F2$ ، محرک‌های پخش‌شده بین جفت واکه‌های مجاور را به‌طور مبهم درک می‌کنند. براساس داده‌های به‌دست‌آمده، جداول «ارزش‌های قطعی» و «ارزش‌های فازی» واکه‌ها شکل گرفتند و مناطق «وضوح شنیداری» و «ابهام شنیداری» مشخص شدند. از سوی دیگر، در نظریه مجموعه‌های فازی، هر عنصر از یک مجموعه با درجه عضویتی یگانه به فضای فازی تعلق دارد، بنابراین امکان محاسبات در مناطق غیرقطعی و مبهم میسر است. بر همین اساس، نتایج حاصل از آزمون شناسایی به‌همراه تخصیص درجه‌ای از عضویت به هر واکه، به‌خوبی هم‌پوشی واکه‌ها را در فضای واکه‌ای تبیین و آن را مدل ساخت.

1. shiiniia@gmail.com

2. mehdi@iust.ac.ir

3. nourbakhsh@alzahra.ac.ir

در نگارش این مقاله از راهنمایی‌های علمی آقای حامد کلانتری (دانشجوی دکتری دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران) بهره‌مند شدم، بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌دارم. ش.ز. همت‌نیا

کلیدواژه‌ها: آواشناسی درکی، واکه‌های فارسی معیار، نظریهٔ مجموعه‌های فازی، درجهٔ عضویت، ارزش‌های قطعی، ارزش‌های فازی

۱- مقدمه

درک گفتار^۱ یکی از مباحث مهم در بررسی‌های زبانی است که سالیان طولانی ذهن پژوهشگران حوزه‌های مختلف از جمله زبان‌شناسان، زبان‌شناسان رایانشی، روان‌شناسان، مهندسان علوم گفتاری و دیگر حوزه‌های تخصصی و میان‌رشته‌ای را به خود مشغول داشته است. این واقعیت که انسان قادر است امواج صوتی آواهای گفتار را توسط سیستم شنیداری دریافت و آنها را درک کند، از عوامل اصلی توجه پژوهشگران به تحقیق در حوزهٔ درک گفتار توسط انسان و همچنین درک گفتار ماشینی بوده است (لوینسون^۲ و لیبرمن^۳، ۱۹۸۱؛ کلت^۴، ۱۹۸۳؛ کاکس^۵، ۱۹۹۰؛ تریپاتی^۶ و همکاران، ۲۰۰۸؛ لونگو^۷ و همکاران ۲۰۱۰).

یکی از روش‌های بررسی درک گفتار، تحقیق دربارهٔ فرکانس‌های سازه‌های گفتار است. از آنجا که فرکانس سازه‌ها از سیگنال‌های آکوستیکی به دست می‌آیند و سیگنال‌ها به‌عنوان درون‌داد درک گفتار توسط انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین طبیعی است که تصور کنیم نمودارهای سازه‌ای می‌بایست تاحدودی نشان‌دهندهٔ فضای درکی واکه‌ای به‌صورت جهانی^۸ باشند. در صورتی که وجود چنین فضایی را بپذیریم، این سؤال مطرح می‌شود که چگونه می‌توان فضای درکی را با مفاهیم آکوستیکی توضیح داد (هیوارد^۹، ۲۰۰۰: ۱۴۸).

نگاهی به پیشینهٔ مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ تولید و درک واکه‌ها نشان می‌دهد که مهمترین سرخ‌های تمایزدهندهٔ واکه‌ها به دو سازهٔ اول باز می‌گردد (دلتر^{۱۰} و همکاران، ۱۹۵۲؛ لده‌فوگد^{۱۱} و مدیسون^{۱۲}، ۱۹۹۹؛ هرینگتون^{۱۳}، ۲۰۱۰). از جمله نخستین کسانی که به بررسی فضای درکی واکه‌ای با استفاده از واکه‌های مصنوعی پرداختند، دلتر و همکاران (۱۹۵۲) بودند که دو پارامتر F1 و F2 را برای تمایز یک واکه از واکهٔ دیگر کافی دانستند. تأثیر فرکانس پایه (F0) و سازه‌های بالاتر (F3-F5) بر درک واکه‌ها نیز توسط فوجیساکي^{۱۴} و کاواشیمای^{۱۵} (۱۹۶۸) مطرح شد. همچنین با گذشت زمان آشکار شد که «بهنجارسازی»^{۱۶} نیز در درک

1. speech perception

2. S. E. Levinson

3. M. Y. Lieberman

4. D. H. Klatt

5. S. J. Cox

6. H. Tripathy

7. I. Luengo

8. universal perceptual vowel space

9. K. Hayward

10. P. Delattre

11. P. Ladefoged

12. I. Maddieson

13. J. Harrington

14. H. Fujisaki

15. T. Kawashima

16. normalization

واکه‌ها تأثیری بسزا دارد (پیترسون^۱ و بارنی^۲، ۱۹۵۲؛ لده‌فوگد و برودبنت^۳، ۱۹۵۷؛ میلر^۴ ۱۹۸۹؛ هیلنبرند^۵ و همکاران ۱۹۹۵).

در توصیف فرآیند درک واکه‌ها در بافت‌های گوناگون نیز تاکنون نظریه‌های متفاوتی ارائه شده‌است. برخی واکه‌ها را در محیط منفک از بافت و برخی در بافت CVC آزمایش کرده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها، گاه درک واکه‌ها تدریجی^۶ (فرای^۷ و همکاران، ۱۹۶۲؛ هیوارد، ۲۰۰۰: ۱۱۶) و گاه مقوله‌ای^۸ (بل‌برتی^۹ و همکاران، ۱۹۷۹؛ هال^{۱۰}، ۲۰۱۶: ۲۸) گزارش شده‌است. شیوه مطالعه واکه‌ها نیز به طرق مختلف صورت گرفته‌است. بررسی فضای درکی واکه‌ای با ایجاد پیوستاری از محرک‌های مصنوعی، یکی از روش‌های مطالعات است. هال (۲۰۱۶) با بررسی واکه‌های /æ/-/ε/ زبان انگلیسی آمریکایی و انگلیسی بریتانیایی در بافت CVC، با تولید محرک‌های مصنوعی در فضای میان دو واکه، درک این واکه‌ها را در واژه‌های pan-pen بررسی کرده‌است. وی با استناد به نتایج آزمایش خود و هم‌راستا با نظر بل‌برتی و همکاران (۱۹۷۹) نتیجه گرفته است که، به‌رغم تصورات پیشین، درک واکه‌ها مقوله‌ای است. البته وی ذکر دو نکته را در مورد مقایسه نتایج حاصل از این دو قسم تحقیق ضروری می‌داند. اول آنکه در مقاله فرای، شرکت‌کنندگان می‌بایست واج‌ها را تشخیص می‌دادند و نه کلمات، لذا وی با ارائه دلیل از نتایج دیگر محققان نتیجه می‌گیرد که مرزهای درکی میان واکه‌ها در بافت کلمه قابل تشخیص‌ترند، حال آنکه در واکه‌های منفک از بافت، بیشتر حالت پیوستاری دارند. دیگر آنکه دستگاهی^{۱۱} که فرای برای ساخت محرک‌های مصنوعی مورد استفاده قرار داد، از نوع سنتزکننده‌های آنالوگ چهارسازه‌ای بوده، درحالی‌که سنتزکننده‌های کنونی^{۱۲} که در تعامل با یکدیگرند، از امکانات بیشتری برای انجام تنظیمات بر روی سازه‌ها، پهنای باند، دامنه و دیگر مشخصه‌ها برخوردارند و آواهایی دقیق‌تر و طبیعی‌تر ایجاد می‌کنند (همان: ۲۵-۶)

درک واکه‌های مصنوعی فارسی نیز پیش‌تر توسط رحمانی (۱۳۸۹: ۸۰-۷۳) و بی‌جن‌خان (۱۳۹۲: ۱۷۶-۱۷۷) بررسی شده است. شش واکه فارسی معیار براساس الگوی وضعیت پایدار مورد بررسی قرار گرفتند. در این روش، فضای واکه‌ای مصنوعی براساس «الگوی هدف ساده»^{۱۳}

1. G. E. Peterson
2. H. L. Barney
3. D. E. Broadbent
4. J. D. Miller
5. J. Hillenbrand
6. Gradual

7. D. Fry
8. categorical
9. F. Bell-Berti
10. C. Hall
11. Alexander

۱۲. در این مقاله از سنتزکننده گفتار IPOX برای ساخت محرک‌های مصنوعی و از PRAAT برای پردازش نهایی استفاده شده است.

و با تغییر فرکانس سه سازه اول، ساخته شده است. نویسندگان در ابتدای آزمایش فرض را بر درک واکه‌ها براساس مقادیر مطلق فرکانس‌های سازه‌های اول تا سوم قرار دادند، اما در انتهای آزمایش و به اعتبار مشاهدات نتیجه گرفته‌اند که شرکت‌کنندگان فارسی‌زبان، در درک واکه‌ها به دو پارامتر F1 و F2 وابسته هستند و شاهدهی قانع‌کننده دال بر وابستگی آنها به پارامتر F3 نیافته‌اند.

آنچه در بالا به آن اشاره شد، مطالعاتی هستند که اکثراً دارای تحلیل‌های آماری‌اند و برپایهٔ منطق دوارزشی شکل گرفته‌اند. اما ادبیات درک گفتار، دسته‌ای دیگر از پژوهش‌ها را نیز دربردارد که براساس منطق چندارزشی^۱ انجام می‌شود و در منطق فازی ریشه دارد. از اواسط دههٔ شصت قرن بیستم میلادی، زاده^۲ (۱۹۶۵) با انتشار مقاله‌ای تحت عنوان «نظریهٔ مجموعه‌های فازی»^۳، پایه‌های بینشی نو را بنا نهاد و مفاهیمی بدیع اما سازگار با خصوصیات ذاتی انسان را مطرح ساخت. اگرچه مفهوم «فازی» پیش‌تر نیز با عناوینی همچون «عدم قطعیت»^۴، «ابهام»^۵ یا «چندارزشی»^۶ توسط فلاسفه و دانشمندانی نظیر راسل^۷ (۱۹۲۳)، هایزنبرگ^۸ (۱۹۵۸)، لوکاسیویچ^۹ و تارسکی^{۱۰} (۱۹۳۰)، بوخوار^{۱۱} (۱۹۳۸)، کلیین^{۱۲} (۱۹۵۲) و بلک^{۱۳} (۱۹۷۳) معرفی شده بود، اما ابداع نام «فازی» راهی تازه برای پذیرش این ایده باز کرد. به‌دنبال قوت‌گرفتن نظریهٔ فازی و کاربردی‌شدن این نظریه در علوم مهندسی و تأثیر انکارناپذیر آن در ارتقای فناوری‌های جدید، توجه علوم دیگر از جمله علوم انسانی و همچنین شاخه‌های فعال در بررسی‌های زبانی، همچون آواشناسی و مهندسی علوم گفتار نیز به این نگرش جلب شد، به‌ویژه که از طریق این نظریه می‌توان مفاهیم و متغیرهای زبانی را به مقادیر کمی و محاسبه‌پذیر تبدیل کرد. پژوهشگران حوزهٔ گفتار، با تمرکز بر این ویژگی زبان که آواهای آن از یکی به سوی دیگری حرکت می‌کنند بدون آنکه بتوان مرزی قاطع برای آنها تعریف کرد، آواهای گفتار را با استفاده از تکنیک‌های فازی مورد مذاقه قرار دادند. درحقیقت، این ویژگی زبان،

-
1. multi-valued logic
 2. A. L. Zadeh
 3. Fuzzy Sets Theory
 4. uncertainty
 5. vagueness
 6. multi-valued
 7. B. Russell
 8. W. Heisenberg
 9. J. Lukasiewicz
 12. A. Tarski
 11. D. Bochvar
 12. S. Kleene
 13. M. Black

ابهامی از نوع فازی که در آن مرزها درهم آمیخته‌اند را تداعی می‌کند و ذهن را به سمت و سوی جداسدن از محیط‌های قطعی و نزدیک‌شدن به محیطی شولایی^۱ و بدون مرزهای مشخص سوق می‌دهد. لذا، بررسی و تحلیل عدم قطعیت‌ها و استفاده از محاسبات نرم^۲ این امکان را فراهم می‌آورد تا پیچیدگی‌های دنیای واقع، در ساده‌ترین مدل‌ها لحاظ شود.

ردپای منطق فازی در حوزه زبان را می‌توان در آثار افرادی همچون پال^۳ و همکاران (۱۹۷۸)، راپتیس^۴ و کرایانیس^۵ (۱۹۹۷)، تریپاتی و همکاران (۲۰۰۸)، طالب و بنیتو^۶ (۲۰۱۰)، اوستوین^۷ و هانکم^۸ (۲۰۱۵)، حقبین (۱۳۷۹)، بی‌جن‌خان و غفوریان (۱۳۷۵) و دیگران مشاهده کرد. از میان این آثار، برخی به‌طور خاص بر واکه‌ها تمرکز کرده و با توصیف فضای واکه‌ای در چارچوب فازی، سعی در تحلیل واکه‌ها و درک آنها با استفاده از تکنیک‌های فازی داشته‌اند. تریپاتی و همکاران (۲۰۰۸) با هدف بررسی درک گفتار خودکار توسط ماشین که یکی از کاراترین شیوه‌های ارتباطات انسان-ماشین است، تلاش کردند، با استفاده از تکنیک فازی، واکه‌های نادقیق^۹ را طبقه‌بندی کنند. آنها با ضبط واکه‌ها در جمله حامل و استخراج اطلاعات خام و تهیه انگاره تبدیل این داده‌ها به الگوریتم‌های استنتاج فازی، سعی کردند تا درک واکه‌ها توسط رایانه را میسر سازند. در پژوهشی مشابه، طالب و بنیتو (۲۰۱۰: ۸۴۹-۸۴۸) به بررسی واکه‌های زبان عربی پرداختند و با استفاده از ارزش‌های فازی «کم، متوسط، زیاد» سعی کردند تا توصیفی از فضای واکه‌ای براساس دو پارامتر F1 و F2 به‌دست دهند. نویسندگان مقاله با ارائه ورودی‌هایی به‌صورت قواعد «اگر... آنگاه»^{۱۰} و دریافت خروجی آن به‌صورت یک «قاعده»، به‌همراه محاسبه درجاتی از عضویت برای هریک از متغیرهای زبانی، تلاش کردند تا خوانش داده‌ها را با استفاده از قواعد فازی، برای رایانه امکان‌پذیر سازند. اوستوین و هانکم (۲۰۱۵) نیز با بررسی نظریه «کریسپ فیتا»^{۱۱} (میلر^{۱۲} و نایسلی^{۱۳}، ۱۹۵۵) و معرفی نظریه «فازی فیتا»^{۱۴}، طرح مطالعه «مشخصه‌های پیوسته»^{۱۵} براساس نظریه فازی را ارائه کردند. آنها معتقدند که استفاده از تکنیک فازی، مرزهای قطعی طبقه‌بندی واکه‌ای در فضای قطعی را توسعه می‌دهد و موجب می‌شود این مرزها به‌آرامی از یکی به دیگری تبدیل

۱- کلمه «فازی» به نوع خاصی از ابهام اشاره می‌کند که متخصصان فارسی‌زبان برای آن کلمه شولا و مشکوک را پیشنهاد کرده‌اند. (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹)

2. soft computing
3. S. K. Pal
4. S. Raptis
5. G. Carayannis
6. A. Benyetto
7. D. Oosthuizen
8. J. Hanekom

9. imprecise vowel
10. If-then rule
11. Crisp FITA (Feature Information Transmission Analysis) Theory
12. G. A. Miller
13. P. E. Nicely
14. Fuzzy FITA Theory
15. Continuous Feature

شوند. همچنین بر این باورند که بهره‌جستن از درجه عضویت عناصر، قادر است انتقاداتی که بر نظریه «کریسپ فیتا» در مورد تقسیم‌بندی درون-طبقه‌ای^۱ و میان-طبقه‌ای^۲ واکه‌ها وارد است را برطرف سازد.

با در نظر گرفتن ادبیات فوق، پژوهش حاضر کوشیده است با ایجاد فضای واکه‌ای مصنوعی، واکه‌های فارسی معیار را با توجه به تغییرات دو پارامتر $F1$ و $F2$ ، در چارچوب «نظریه فازی» بررسی کند و هم‌پوشی واکه‌ها را در فضای بین جفت‌واکه‌های مجاور به‌نمایش گذارد و در نهایت ابهام و عدم قطعیت در این فضا را مدل سازد.

۲- چارچوب نظری

زاده (۱۹۶۵) منطق فازی را با هدف توسعه مدلی کارآمدتر برای توصیف فرآیند پردازش زبان‌های طبیعی معرفی کرد. وی با ارائه «نظریه مجموعه‌های فازی» به محاسبه و تبیین مناطقی که عدم قطعیت در آن وجود دارد پرداخت و مفاهیمی همچون مجموعه‌های فازی^۳، اعداد فازی^۴، درجه عضویت^۵، فازی‌سازی^۶، فازی‌زدایی^۷ و دیگر مفاهیم مشابه را وارد علوم ریاضیات و مهندسی کرد. کمک اصلی نظریه مجموعه‌های فازی، توانایی آن در نشان‌دادن داده‌های مبهم است و عدم قطعیت در دنیای واقع را با پیوستاری از درجات عضویت مشخص می‌کند. در واقع، این نظریه دنیا را نه به صورت سیاه‌وسفید، بلکه به صورت طیفی خاکستری از واقعیت‌ها می‌بیند و اجازه می‌دهد تا مفاهیمی همچون «نسبتاً»، «تقریباً»، «تأخودی» و نظایر آن که به استدلال انسانی نزدیک است، به صورت ریاضی مدل شوند. به عبارت دیگر، مجموعه‌های فازی برای توصیف مفاهیم مبهمی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن درجه عضویت هر عضو از مجموعه توسط تابع عضویت تعیین می‌شود و یک عدد حقیقی بین ۰ تا ۱ را به‌عنوان درجه عضویت به هر عضو تخصیص می‌دهد.

در ادامه، پیش از پرداختن به بحث اصلی این مقاله که همان مدل‌سازی واکه‌های فارسی معیار بر پایه نظریه فازی است، لازم است به برخی مفاهیم اولیه «نظریه مجموعه‌های فازی»

-
1. within category
 2. between category
 3. fuzzy set
 4. fuzzy number
 5. membership function
 6. fuzzification
 7. defuzzification

(برگرفته از غضنفری و کاظمی، ۱۳۹۳؛ غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹؛ زیمرمان^۱، ۲۰۱۰) اشاره شود.

۲-۱- مفاهیم پایه

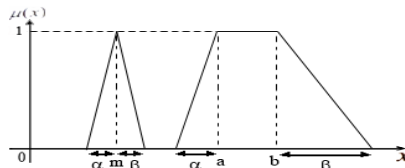
مجموعه فازی: «مجموعه فازی» مجموعه‌ای است که هر عضو آن با یک درجه عضویت بیان شده باشد. در واقع، تابع عضویت آن نگاشتی از X بر $[0,1]$ است. مجموعه فازی به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad \text{فرمول (۱)}$$

اگر X مجموعه عناصری باشد که توسط x مشخص می‌شوند، آنگاه مجموعه فازی \tilde{A} در X یک مجموعه از زوج‌های مرتب است.

تابع (درجه) عضویت: تخصیص یک ارزش به هر یک از اعضای مجموعه مرجع به معنای درجه عضویت این اعضا در یک مجموعه خاص با مرزهای غیرشفاف^۲ است. در نمایش مجموعه فازی فوق (فرمول ۱)، $\mu_{\tilde{A}}(x)$ تابع (درجه) عضویت است.

نمایش عدد فازی: تغییر شکل تابع عضویت، اعداد مختلفی را به وجود می‌آورد و هر عدد فازی را می‌توان با یک شکل نشان داد. شکل ۱ اعداد فازی مثلثی^۳ (چپ) و دوزنقه‌ای^۴ (راست) را به تصویر کشیده است. این اعداد، محدب و نرمال هستند.



شکل ۱- نمایش اعداد فازی مثلثی و دوزنقه‌ای (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹: ۱۱۱-۱۱۰)

اعداد فازی: مجموعه‌های فازی هستند که محدب بوده و دارای یک یا چند عضو با درجه عضویت ۱ هستند. به بیان دیگر، آنها مجموعه‌های فازی هستند که معانی عباراتی همچون «تقریباً»، «نزدیک به»، «تاحدودی» و مفاهیم مشابه را بیان می‌کنند.

مجموعه فازی نرمال: یک مجموعه فازی زمانی «نرمال» نامیده می‌شود که حداقل یک نقطه در مجموعه مرجع آن درجه عضویتی برابر با ۱ داشته باشد.

1. H. J. Zimmermann
2. unsharp boundaries
3. triangular
4. trapezoidal

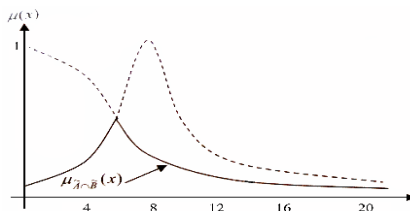
مجموعه فازی محدب^۱: مجموعه‌ای محدب است که در آن تابع عضویت مجموعه فازی بیش از یک مرتبه بالا و پایین نرود.

متغیر زبانی: یک «متغیر زبانی» متغیری است که شناسه‌ها یا آرگومان‌های آن، اعداد فازی هستند و به‌طور کلی‌تر، کلماتی هستند که به‌وسیله مجموعه‌های فازی بیان می‌شوند. ارزش‌های فازی: شناسه‌های یک متغیر زبانی هستند و هریک از آنها به‌وسیله تابع عضویتشان مدل می‌شوند.

عملگر اشتراک: از جمله عملیات پایه بر روی مجموعه‌های فازی، اشتراک مجموعه‌هاست. از آنجا که تابع عضویت، یکی از اجزای بسیار مهم در مجموعه‌های فازی است، لذا عملیات روی این مجموعه‌ها به‌وسیله توابع عضویت آنها تعریف می‌شود. اشتراک دو مجموعه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

فرمول (۲)

$$\mu_{(\tilde{A} \cap \tilde{B})}(x) = \min\{\mu_{(\tilde{A})}(x), \mu_{(\tilde{B})}(x)\}; x \in X\}$$



شکل ۲- دیاگرام زاده برای اشتراک مجموعه‌های فازی \tilde{A} و \tilde{B} (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹: ۴۳)

اصل توسعه: یکی از مفاهیم بسیار مهم در تئوری فازی «اصل توسعه» است. این اصل تعریف می‌کند که چگونه می‌توان دامنه یک تابع قطعی به‌خصوص را گسترش داد تا مجموعه‌های فازی را نیز دربرگیرد.

۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر به بررسی فضای درکی واژه‌های فارسی معیار پرداخته و سعی در مدل‌سازی آن در چارچوب نظریه فازی دارد. در این جستار با بهره‌گیری از آزمایش‌های درکی معرفی شده در ادبیات (رحمانی، ۱۳۸۹: ۶۵؛ بی‌جن‌خان، ۱۳۹۲: ۱۷۵-۱۷۳؛ هال، ۲۰۱۶: ۱۵-۱۱)، آزمایشی به‌شرح ذیل طراحی و اجرا شده است.

۳-۱- شرکت‌کنندگان

شرکت‌کنندگان عبارت بودند از ده گویشور مذکر و ده گویشور مؤنث که به‌طور تصادفی انتخاب شدند. میانگین سن آزمودنی‌ها عبارت بود از ۳۱/۳۵، و محدوده سنی آن‌ها بین ۲۴ تا ۴۶ سال بود. هیچ‌یک از آنها سابقه ابتلا به اختلال شنوایی را گزارش نکردند. همگی متولد تهران بودند و تنها به زبان فارسی معیار صحبت می‌کردند و با زبان انگلیسی نیز به‌عنوان زبان دوم آشنا بودند.

۳-۲- محرک‌های مصنوعی

شش واکه مصنوعی زبان فارسی با الگوی پنج‌سازه‌ای و براساس داده‌های جدول ۱ ساخته شدند. سپس با ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترها و تنها با ایجاد تغییرات منظم و کنترل‌شده بر روی دو پارامتر F1 و F2، طیفی از محرک‌های مصنوعی در فضای واکه‌ای و طی ۱۸ گام ساخته شد. تعداد گام‌های ایجادشده نسبت به آنچه در ادبیات ذکر شد اضافه‌تر است زیرا تعداد واکه‌ها در زبان فارسی معیار درمقایسه با واکه‌های جهانی کمتر است، بنابراین فاصله واکه‌ها از یکدیگر، به‌ویژه در واکه‌های پیشین، بیشتر است. لذا، تعداد گام‌های بیشتر امکان دستیابی به فرکانس‌هایی دقیق‌تر در مناطق عدم قطعیت را میسر می‌سازد و رسم اعداد فازی با دقت بیشتری امکان‌پذیر است.

محرک‌های مصنوعی در نرم‌افزار KlattWorks نسخه 2.29 (مک‌مورای^۱، ۲۰۱۳ و ۱۳۹۸) ساخته شدند و هم‌سطح‌کردن میزان شدت کلی محرک‌ها در نرم‌افزار PRAAT نسخه 6.0.28 (بورسما^۲ و وینینک^۳، ۲۰۱۷) انجام شد. برای ساخت این محرک‌ها، فرکانس سازه اول (F1) بین ۳۶۵-۹۹۰ هرتز و فرکانس سازه دوم (F2) بین ۲۷۸۵-۷۳۱ هرتز متغیر بوده‌است. فرکانس سازه سوم (F3) نیز بین ۳۰۰۰-۲۵۰۰ هرتز تعیین شد. سازه‌های چهارم (F4) و پنجم (F5) نیز بر روی فرکانس‌های ۳۵۰۰ و ۴۵۰۰ هرتز ثابت بودند. طول هر واکه برابر ۵۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شد و فرکانس پایه با ۱۳۰ هرتز آغاز شد و در انتهای واکه به ۷۶ هرتز کاهش یافت تا آهنگی افتان به‌دست آید. فرکانس نمونه‌برداری نیز برابر با ۲۲۰۵۰ هرتز تنظیم شد (جدول ۱).

تعداد کل محرک‌ها ۹۶ نمونه بود که به‌عنوان درون‌دادِ آزمون شنیداری، برای بررسی میزان حساسیت درکی شنوندگان نسبت به تغییرات تدریجی سازه‌های اول و دوم، مورد استفاده قرار گرفت. هر محرک به‌صورت یک واکه و مجزا از بافت ساخته و در فایل‌های جداگانه ذخیره شد.

1. B. McMurray
2. P. Boersma
3. D. Weenink

جدول ۱- مقادیر عددی ساخت محرک‌های مصنوعی شش واکه فارسی معیار

u	o	a	a	e	i	واکه‌ها
۳۷۱	۵۶۶	۷۵۰	۹۹۰	۵۵۰	۳۶۵	فرکانس سازه اول (هرتز)
۷۳۱	۹۲۱	۱۲۵۱	۱۷۲۲	۲۱۵۳	۲۷۸۵	فرکانس سازه دوم (هرتز)
۲۵۰۰-۳۰۰۰						فرکانس سازه سوم (هرتز)
۳۵۰۰						فرکانس سازه چهارم (هرتز)
۴۵۰۰						فرکانس سازه پنجم (هرتز)
۵۰۰						طول واکه (میلی‌ثانیه)
۱۳۰-۷۶						فرکانس پایه (هرتز)
۲۲۰۵۰						فرکانس نمونه‌برداری (هرتز)
۷۲						شدت محرک (دسی‌بل)

۳-۳- آزمون درکی و شیوه اجرا

آزمون درکی در قالب آزمون شناسایی^۱ طراحی و اجرا شد. به‌منظور اجرای آزمون، یک دستگاه لپ‌تاپ، گوشی معمولی و برنامه مخصوص انجام آزمون که بر روی نرم‌افزار PRAAT قابل اجرا است، مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش در محیطی آرام و برای هر شرکت‌کننده در یک جلسه انجام شد و پیش از انجام آزمون، توضیحات لازم در مورد شیوه اجرای آن به افراد ارائه شد. در ادامه، هریک از محرک‌های مصنوعی دو بار و به‌طور اتفاقی، برای تک‌تک شرکت‌کنندگان پخش شد و از شرکت‌کننده درخواست شد تا پس از شنیدن محرک، انتخاب کند که از بین شش واکه موجود بر روی صفحه نمایشگر کدامیک را شنیده است. پخش مجدد هر محرک برای شرکت‌کننده تا دو بار امکان‌پذیر بود و در صورت تمایل، امکان بازگشت و اصلاح پاسخ نیز وجود داشت. پس از انتخاب یکی از شش گزینه موجود، برنامه به‌طور خودکار محرک بعدی را پخش می‌کرد. تعداد کل نمونه‌های پخش‌شده برای یک شرکت‌کننده ۹۶×۲ محرک و تعداد کل پاسخ‌های جمع‌آوری‌شده از تمامی شرکت‌کنندگان برابر با ۳۸۴۰ نمونه بود که در جداول نرم‌افزار PRRAT برای هریک از شرکت‌کنندگان به‌صورت جداگانه ذخیره شد و در نهایت به‌صورت فایل‌های طبقه‌بندی‌شده به نرم‌افزار اکسل منتقل شد.

۴- بحث و تحلیل

براساس داده‌های استخراج‌شده از نتایج آزمون درکی، بازه‌هایی از فرکانس‌های سازه‌های اول و دوم که در آن مناطق واکه به‌طور قطعی درک شده یا دارای ابهام شنیداری بود، مشخص شد. مقادیر کمی این فرکانس‌ها تحت عنوان «ارزش‌های قطعی» و «ارزش‌های فازی» واکه‌ها در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌است.

1. identification test

جدول ۲ به بازه‌ای از مقادیر عددی فرکانس‌های سازه‌های اول و دوم اشاره می‌کند که دارای «ارزش قطعی» هستند و در آن «وضوح شنیداری» وجود دارد. به عبارت دیگر در این فرکانس‌ها، شرکت‌کنندگان هریک از شش واکه را به‌طور قطعی شنیده و گزارش کرده‌اند.

جدول ۲- ارزش‌های قطعی سازه‌های اول و دوم واکه‌های فارسی معیار

ارزش‌های قطعی واکه						سازه‌ها
u	o	a	a	e	i	
۳۷۱-۳۸۱	۵۶۶-۵۷۵	۷۳۰-۷۷۵	۹۴۳-۹۹۰-۹۵۱	۵۱۱-۵۹۵	۳۶۵-۳۷۴	F1
۷۳۱-۷۴۱	۹۲۱-۹۳۸	۱۲۱۶-۱۳۰۰	۱۶۴۲-۱۷۲۲-۱۷۶۷	۲۱۰۷-۲۲۸۶	۲۷۵۱-۲۷۸۵	F2

جدول ۳- ارزش‌های فازی سازه‌های اول و دوم واکه‌های فارسی معیار

ارزش‌های فازی واکه						سازه‌ها
ũ	õ	ã	ã	ẽ	ĩ	
۵۶۶-...	۷۳۰-۳۸۱	۹۵۱-۵۷۵	۵۹۵-۹۹۰-۷۷۵	۳۷۴-۸۲۷	...-۵۱۱	F1
۹۲۱-...	۱۲۱۶-۷۴۱	۱۶۴۷-۹۳۸	۲۱۰۷-۱۷۲۲-۱۳۰۰	۲۷۵۱-۱۸۸۰	...-۲۲۸۶	F2

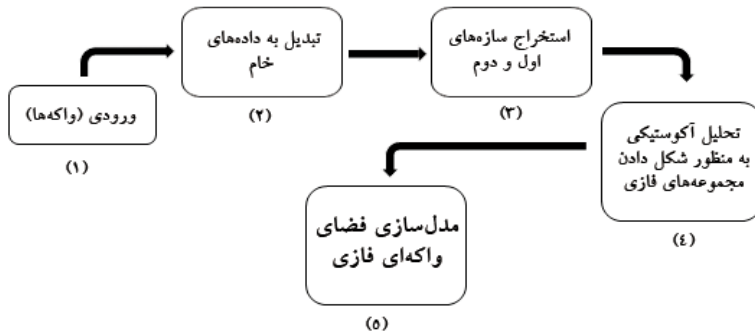
جدول ۳، به «ارزش‌های فازی» اشاره می‌کند. در واقع، جدول ۳ همان توسعه جدول ۲ است که علاوه بر ارزش‌های قطعی، فرکانس‌هایی که در آن عدم قطعیت و ابهام در درک واکه وجود دارد را نیز دربر گرفته است. در اینجا ذکر دو نکته ضروری است. اول، همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، عدد فازی واکه [a] به سه فرکانس اشاره می‌کند. دلیل این امر آن است که فرکانس سازه اول در این واکه از [e] به [a] در حال افزایش است و مجدداً برای شکل‌دادن واکه [a] کاهش می‌یابد. دوم، اعداد فازی واکه‌های [i] و [u] به ترتیب در کران راست با واکه [e] و در کران چپ با واکه [o] دارای اشتراک هستند، اما کران دیگر این واکه‌ها باز است و با نقطه‌چین نمایش داده شده است. در ادامه با رسم نمودار دو بعدی واکه‌ها (ن.ک شکل ۷) این موارد به‌صورت تصویری نیز نشان داده شده است.

۱-۴- مدل‌سازی واکه‌ها در چارچوب نظریه فازی

با استخراج ارزش‌های قطعی و فازی واکه‌ها، شناختی نسبی از فازی‌بودن فضای درکی واکه‌ای به‌دست آمده است. حال می‌توان ادعا کرد که مدل تبدیل فضای قطعی واکه‌ها به محیطی فازی، براساس انگاره شکل ۳ در حال پیشرفت است.

سه مرحله نخست انگاره (ورودی (واکه‌ها)، تبدیل به داده‌های خام و استخراج سازه‌های اول و دوم)، در بخش‌های پیشین توضیح داده شد و جمع‌بندی آن در دو جدول ۲ و ۳، تحت عنوان «ارزش‌های قطعی» و «ارزش‌های فازی» ارائه شد. اکنون، به‌منظور اجرای مرحله ۴ و

شکل دادن مجموعه‌های فازی واکه‌ها، از اطلاعات خام طبقه‌بندی‌شده در جداول ۲ و ۳ و مفهومی به نام «اصل توسعه» که در بخش ۲-۱- مفاهیم پایه به آن اشاره شد، استفاده می‌کنیم.



شکل ۳- انگاره تبدیل فضای درکی واکه‌ای به فضای فازی

براساس مفهوم اصل توسعه، هر تابع قطعی را می‌توان توسعه داد تا مجموعه‌های فازی را نیز دربرگیرد و در یک دامنه فازی با این مجموعه‌ها کار کند. حال، اگر مجموعه فازی \tilde{A} که بر روی عناصر X_1, X_2, X_n, \dots از مجموعه مرجع X تعریف شده است را در نظر بگیریم، این مجموعه به صورت زیر نمایش داده می‌شود (غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹):

$$\tilde{A} = \{(x_1 \cdot \mu_{\tilde{A}}(x_1)) \cdot (x_2 \cdot \mu_{\tilde{A}}(x_2)) \cdot \dots \cdot (x_n \cdot \mu_{\tilde{A}}(x_n))\} \quad (3)$$

انطباق داده‌های جداول ۲ و ۳ با فرمول فوق، مجموعه‌های فازی سازه‌های اول و دوم هریک از واکه‌های فارسی معیار را به همراه درجه عضویت مناطق قطعی و درجه عضویت در ابتدا و انتهای کران‌های راست و چپ به دست می‌دهد. هریک از این اعداد فازی، در مجموعه‌هایی چهارعضوی ارائه شده‌اند که عضو اول هر زوج بیانگر فرکانس سازه و عضو دوم آن، درجه عضویت همان فرکانس است. هر مجموعه یک عدد فازی دوزنقه‌ای را شکل می‌دهد که درجه عضویت در ابتدا و انتهای کران‌های آن صفر و در مناطق قطعی ۱ است. مجموعه‌های فازی واکه‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌است.

جدول ۴- مجموعه‌های فازی واکه‌های فارسی معیار

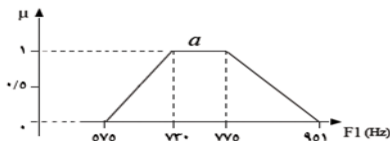
واکه‌ها	عدد فازی سازه اول (F1)	عدد فازی سازه دوم (F2)
i	{(365,1), (374,1), (511,0)}	{(2785,1), (2751,1), (2286,0)}
e	{(374,0), (511,1), (595,1), (827,0)}	{(2751,0), (2286,1), (2107,1), (1880,0)}
ā	{(595,0), (827,1), (990,1), (951,1), (775,0)}	{(2107,0), (1880,1), (1722,1), (1642,1), (1300,0)}
ā	{(951,0), (775,1), (730,1), (575,0)}	{(1642,0), (1300,1), (1216,1), (938,0)}
ō	{(730,0), (575,1), (566,1), (381,0)}	{(1216,0), (938,1), (921,1), (741,0)}
ū	{(566,0), (381,1), (371,1), (0,0)}	{(921,0), (741,1), (731,1), (0,0)}

گام آخر در انگاره شکل ۳ (مرحله ۵)، مدل‌سازی فضای واکه‌ای فازی است که خود طی چند مرحله امکان‌پذیر است:

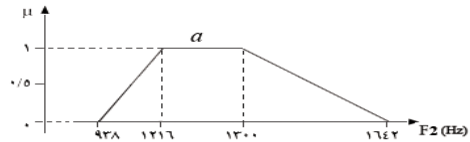
- نمایش اعداد فازی سازه‌های اول و دوم ($F2, F1$)
- مدل‌سازی فازی با استفاده از متغیر زبانی
- نمایش فازی فضای واکه‌ای

۲-۴- نمایش اعداد فازی سازه‌های اول و دوم ($F2, F1$)

با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های درکی، اعداد فازی سازه‌های اول و دوم، مجموعه‌های فازی تقریباً محدب‌اند. لذا در این مطالعه، به‌جای استفاده از اعداد ناهمگون^۱ و غیرمحدب^۲ از تقریب آنها استفاده شده است و اعداد فازی سازه‌ها با مجموعه‌های فازی محدب‌شکل تخمین زده شده و دوزنقه کامل در نظر گرفته شدند (نقل به مضمون، غضنفری و رضایی، ۱۳۸۹: ۳۳۷-۳۳۸). شکل ۴ (الف و ب) رسم اعداد فازی سازه‌های اول و دوم است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- نمایش اعداد فازی سازه‌های اول و دوم

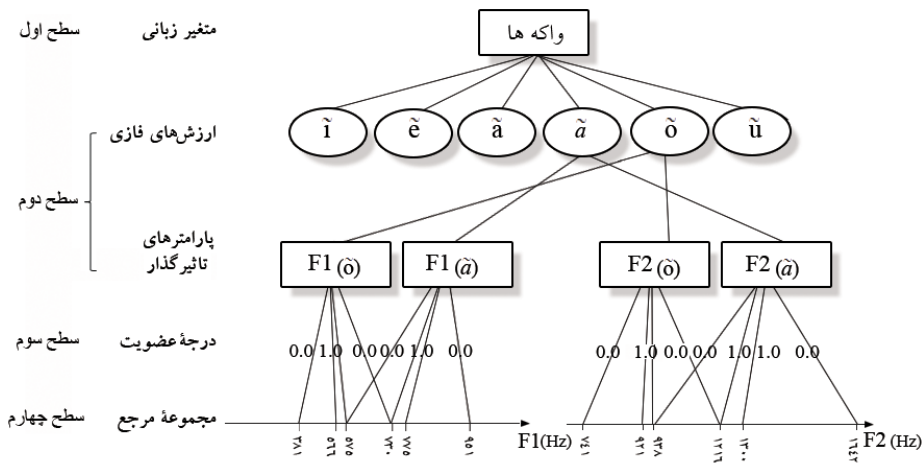
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، این اعداد از نوع دوزنقه‌ای و در برخی مناطق دارای درجه عضویت ۱ هستند. عدد فازی سازه اول ($F1$) این واکه (شکل ۴-الف) در کران چپ، در فرکانس ۵۷۵ هرتز و دارای درجه عضویت صفر است، بین فرکانس‌های ۷۳۰ تا ۷۷۵ هرتز دارای درجه عضویت ۱ است و در فرکانس ۹۵۱ هرتز مجدداً درجه عضویت به صفر می‌رسد. سازه دوم این واکه نیز دارای وضعیتی مشابه است. در فرکانس ۹۳۸ هرتز، درجه عضویت برای سازه دوم صفر است. به تدریج، مقدار درجه عضویت افزایش می‌یابد و بین فرکانس‌های ۱۲۱۶ تا ۱۳۰۰ هرتز درجه عضویت این سازه به ۱ می‌رسد و بالاتر از ۱۳۰۰ هرتز، درجه عضویت کاهش می‌یابد تا در ۱۶۴۲ هرتز مجدداً به صفر می‌رسد.

۳-۴- مدل‌سازی فازی با استفاده از متغیرهای زبانی

زاده در نظریه ۱۹۶۵ خود، یکی از علل استفاده از متغیرهای زبانی را شیوه تفکر انسان برمی‌شمرد و معتقد است انسان‌ها مفاهیم ذهنی خود را با به‌کارگیری همین متغیرها و نه با

1. asymmetric
2. nonconvex

استفاده از مقادیر کمی، به یکدیگر منتقل می‌کنند. لذا درصدد تبدیل این متغیرها به مقادیر محاسبه‌پذیری برمی‌آید که قابلیت فهم برای ساخته‌های بشری را دارا باشد. انطباق نظر فوق بر فضای واکه‌ای، امکان رسم واکه‌ها را برپایه ریاضیات فازی فراهم می‌سازد. براساس مفاهیم نظریه مجموعه‌های فازی، واکه‌ها را می‌توان در حکم متغیرهایی در نظر گرفت که در آن هر واکه یک «ارزش فازی» محسوب می‌شود. این ارزش‌های فازی به وسیله توابع عضویشان مدل می‌شوند و ممکن است به گونه‌ای که در شکل ۵ نشان داده شده است، فرمول‌بندی شوند.



شکل ۵- مدل‌سازی فازی با استفاده از متغیر زبانی

همان‌گونه که در شکل مشهود است، چهار سطح مختلف در تعریف متغیرهای زبانی وجود دارد. همه این چهار سطح در تعریف یک متغیر لازم هستند (غضنفری و رضایی: ۱۳۸۹: ۲۷۷). لذا، برای مدل‌کردن واکه‌ها در چارچوب نظریه فازی، شناسایی سطوح برشمرده ضروری است:

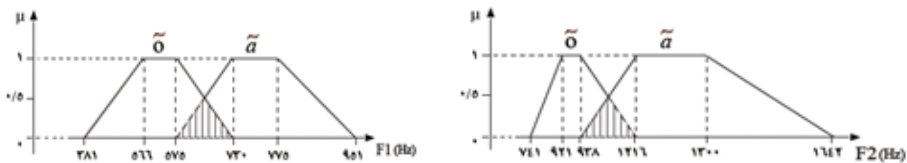
(الف) متغیر زبانی (متغیر فازی): متغیر فازی در این مطالعه، واکه‌های زبان هستند.

(ب) شناسه‌ها (ارزش‌های) فازی: شش واکه فارسی معیار، ارزش‌های فازی متغیر زبانی هستند. هر یک از شش واکه، دارای دو پارامتر تأثیرگذار $F1$ و $F2$ است. برای هر یک از سازه‌های اول و دوم یک عدد فازی تعریف شده است (ن. ک جدول ۴) و عدد فازی واکه، از تلفیق اعداد فازی این دو سازه به دست می‌آید.

(ج) درجه عضویت: درجه عضویت برای هر واکه از صفر به ۱ افزایش می‌یابد و در یک بازه مقدار آن ثابت و برابر با ۱ است، سپس مجدداً کاهش می‌یابد تا در نقطه صفر پایان پذیرد.

(د) مجموعه مرجع: این مجموعه برای سازه اول ($F1$) بین صفر تا ۱۰۰۰ هرتز و برای سازه دوم ($F2$) بین صفر تا ۳۰۰۰ هرتز تعریف شده است.

استفاده از تکنیک فازی، عدم پیوستگی در مرز طبقه‌بندی نمونه‌ها را با اختصاص یک درجه عضویت به هر واکه به‌خوبی توصیف می‌کند. درجات عضویت که با اعداد حقیقی بیان می‌شوند، در محدوده بین صفر (بدون عضویت)^۱ تا ۱ (عضویت کامل)^۲ تغییر می‌کنند. به این ترتیب، هر واکه می‌تواند به بیشتر از یک طبقه اختصاص داشته باشد. (اوستویزن و هانکم، ۲۰۱۵: ۱۹۸۶). در شکل ۵، ارزش پارامترهای تأثیرگذار هر واکه (F1, F2) توسط درجه عضویت آن (سطح سوم) مشخص شده‌است. این مناطق بر روی شکل ۶ با وضوح بیشتری رسم شده است. مثلث‌های هاشورخورده، منطقه اشتراک اعداد فازی سازه‌های اول و دوم را نشان می‌دهند و درجه عضویت سازه‌ها در این مناطق بین صفر تا ۱ در تغییر است.

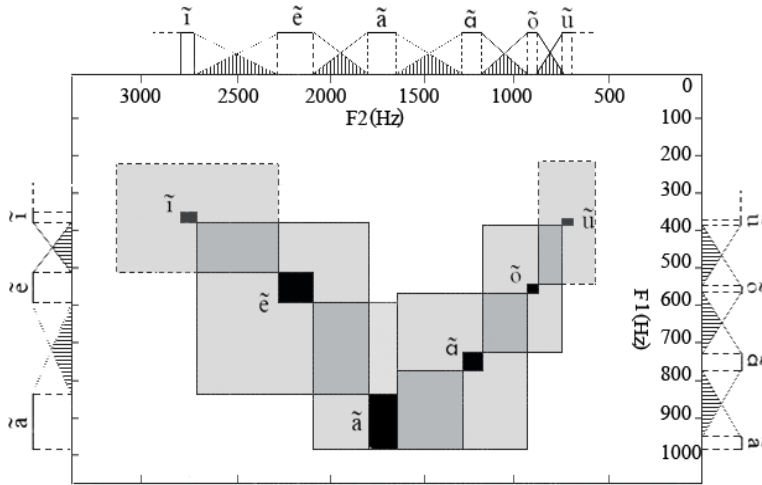


شکل ۶- نمایش هم‌پوشی سازه‌های اول و دوم در دو واکه مجاور

۴-۴- نمایش فازی فضای واکه‌ای (دوبعدی)

در نمودارهای سنتی فضای واکه‌ای، یک نقطه نماینده جایگاه یک واکه است. در واقع، یک نقطه نمایانگر «نمونه اعلا»ی واکه بر روی نمودار است (هیوارد، ۲۰۰۰: ۱۴۷)، در حالی که در فضای فازی، واکه‌ها به آرامی از یکی به دیگری تغییر می‌کنند بدون آنکه بتوان مرزی دقیق میان آنها تعیین کرد. حال، سؤالی مطرح است: در صورتی که اعداد قطعی سازه‌های اول و دوم به اعداد فازی تبدیل شوند، چه تغییری در نمودار سنتی واکه‌ها به‌وجود می‌آید؟

1. no membership
2. complete membership



شکل ۷- نمودار فازی دوبعدی واکه‌های فارسی معیار

همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، اعداد فازیِ سازه‌ها بر روی دو محور عمودی (F1) و افقی (F2) رسم شده است. از آنجا که فرکانس سازه اول برای سه واکه [i, e, a] از [i] به [a] در حال افزایش است و مجدداً در واکه‌های [a, o, u] کاهش می‌یابد، برای اجتناب از تداخل رسم اعداد فازی، این دو گروه بر روی دو محور عمودی جداگانه رسم شده‌اند (واکه‌های پیشین محور سمت چپ و واکه‌های پسین محور سمت راست). همچنین، عدد فازیِ سازه اول (F1) مربوط به واکه [a]، به این دلیل که در کران چپ با واکه [e] و در کران راست با واکه [ɑ] هم‌پوشی دارد، بر روی هر دو محور رسم شده است.

اعداد فازیِ سازه دوم (F2) نیز بر روی محور افقی به‌نمایش درآمده و به‌طور متوالی از فرکانس نزدیک به ۳۰۰۰ هرتز در واکه [i] به حدود ۳۵۰ هرتز در واکه [u] کاهش می‌یابد. با نگاهی دقیق به نمودارِ شکل ۷، چهار منطقه به‌شرح ذیل قابل تشخیص است:

الف) بر روی محورهای F1 و F2، مناطق «هم‌پوشی سازه‌ها» به‌شکل مثلث‌های هاشورخورده، بین اعداد فازی مشخص شده‌اند. این بخش منطقه اشتراک اعداد فازی در دو سازه مجاور است. «درجه عضویت» در این مناطق به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min\{\mu_{(v_1 \cap v_2)}(f_1)\} = \mu_{(v_1)}(f_1) \cdot \mu_{(v_2)}(f_1); f_1 \in F1$$

فرمول

$$\min\{\mu_{(v_1 \cap v_2)}(f_2)\} = \mu_{(v_1)}(f_2) \cdot \mu_{(v_2)}(f_2); f_2 \in F2 \quad (4)$$

ب) مناطق سیاه‌رنگ، منطقه «وضوح شنیداری» واکه‌ها را نشان می‌دهد. «وضوح شنیداری» به این معناست که در بازه‌ای از فرکانس‌های F1 و F2، همه شرکت‌کنندگان در آزمون درکی،

واکه را به‌طور قطعی درک و گزارش کرده‌اند. «ارزش قطعی» فرکانس‌های دو سازه اول برای واکه‌های فارسی معیار، در جدول ۲ گزارش شده است. «درجه عضویت» در این مناطق نیز به‌شرح ذیل است:

$$\mu_{(v)}(f1) = 1 \quad \text{and} \quad \mu_{(v)}(f2) = 1 \quad (\delta)$$

ج) مناطق خاکستری روشن، نشان‌دهنده «ابهام شنیداری» است. در این مناطق درک واکه‌ها مبهم است، و دو یا چند واکه شنیده می‌شود. درواقع این بخش منطقه‌ای فازی است که در اطراف منطقه قطعی ایجاد شده است و درجه عضویت در این مناطق بین صفر تا ۱ متغیر است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$0 \leq \mu_{(v)}(f1) < 1 \quad \text{and} \quad 0 \leq \mu_{(v)}(f2) \leq 1$$

or فرمول (۶)

$$0 \leq \mu_{(v)}(f1) \leq 1 \quad \text{and} \quad 0 \leq \mu_{(v)}(f2) < 1$$

د) مناطق خاکستری تیره، نشان‌دهنده مناطق «هم‌شنیداری» هستند که دو واکه مجاور در اختلاط باهم شنیده می‌شود. این مناطق که محدوده مشترک میان دو واکه هستند، از تداخل محدوده فازی اطراف یک واکه با واکه مجاور شکل می‌گیرند. پنج منطقه هم‌شنیداری $[\tilde{I}-\tilde{E}]$ ، $[\tilde{E}-\tilde{A}]$ ، $[\tilde{A}-\tilde{O}]$ و $[\tilde{O}-\tilde{U}]$ مربوط به واکه‌های فارسی معیار که در شکل ۷ به‌رنگ خاکستری تیره مشخص شده‌اند، درواقع، سایه مناطق فازی واکه‌های مجاور بر روی هم هستند که مناطق «هم‌شنیداری» را شکل می‌دهد. درجه عضویت در محدوده اشتراک میان دو واکه، بین صفر تا ۱ متغیر است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$0 < \mu_{(v1 \cap v2)}(f1) < 1 \quad \text{and} \quad 0 < \mu_{(v1 \cap v2)}(f2) < 1 \quad \text{فرمول (۷)}$$

به‌عنوان جمع‌بندی نهایی، باید اذعان داشت که یکی از مشکلات اساسی محیط‌های قطعی، عدم پیوستگی در مرز طبقات است، به‌گونه‌ای که در برخی موارد، قراردادن یک عضو در یک مجموعه را با چالشی اساسی مواجه می‌سازد. درمقابل، نظریه مجموعه‌های فازی با تخصیص درجه‌ای از عضویت به هر عضو، قادر است به‌طور همزمان تعلق یک عضو را به دو یا چند مجموعه نشان دهد. تلاش ما نیز در این مطالعه بر آن بود تا با فازی‌سازی ارزش‌های قطعی واکه‌ها، محوشدن مرزهای قطعی نمودارهای سنتی و ابهام و عدم قطعیت در فضای میان جفت‌واکه‌های مجاور را با استفاده از این نظریه به‌نمایش بگذاریم.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با اتخاذ رویکردی فازی به مباحث صوت‌شناختی-درکی، به مدل‌سازی فضای واکه‌ای در چارچوب نظریه فازی پرداخته است. در این راستا، ساخت طیف وسیعی از محرک‌های مصنوعی در محیطی کنترل‌شده و برگزاری آزمون‌های درکی شناسایی، «ارزش‌های قطعی» و «ارزش‌های فازی» واکه‌ها را مشخص کرد. رسم «اعداد فازی سازه‌ها»، تعیین سطح اشتراک سازه‌ها در دو واکه مجاور و تلفیق این اعداد بروی نمودار دوبعدی، امکان رسم «نمودار فازی واکه‌ها» را میسر ساخت. در ادامه مباحث نیز مناطق «هم‌پوشی سازه‌ای»، «وضوح شنیداری»، «هم‌شنیداری» و «ابهام شنیداری»، توصیف و نمایش داده شد. در مجموع، یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در فضای واکه‌ای، فرکانس‌هایی وجود دارند که درک واکه در آن فرکانس با ابهام و عدم قطعیت مواجه است و ریاضیات فازی، امکان اندازه‌گیری و نمایش این مناطق را فراهم می‌آورد. سخن آخر آنکه، مدل‌سازی فازی علاوه بر مباحث درکی، قابلیت انطباق بر دیگر موضوعات زبانی، از جمله تولید آواهای گفتار، تولید و درک گفتار رایانه‌ای، ژانرهای موسیقایی، آهنگ، و موارد دیگر را داراست و می‌تواند آغازی برای مطالعات آتی باشد.

منابع

بی‌جن‌خان، محمود و محمدعلی غفوریان (۱۳۷۵). «آموزش و بازشناسی خودکار طبقات واجی در گفتار پیوسته فارسی با استفاده از منطق فازی». کنفرانس بین‌المللی سیستم‌های هوشمند و شناختی: سمپوزیوم سیستم‌های فازی، پژوهشکده سیستم‌های هوشمند و JEE، ۴۵-۵۰.

بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۹۲). *نظام آوایی زبان فارسی*. چاپ اول. تهران: سمت.
حق‌بین، فریده (۱۳۷۹). «مبانی توصیف زبان، منطق ارسطویی یا منطق فازی؟». تهران: بیدار، فروردین و اردیبهشت ۱۳۸۰، شماره ۶، ۲۹-۳۳.

رحمانی، حامد (۱۳۸۹). «آزمون‌های درک گفتار». پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران.
غضنفری، مهدی و محمود رضایی (۱۳۸۹). *مقدمه‌ای بر نظریه مجموعه‌های فازی*. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

غضنفری، مهدی و زهره کاظمی (۱۳۹۳). *اصول و مبانی سیستم‌های خبره*. تهران: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

مک‌مورای، باب (۱۳۹۸). *سنتز گفتار، مروری بر اپلیکیشن KlattWorks و نرم‌افزارهای جانبی آن*. ترجمه: شیرین‌زهرها همت‌نیا و ماندانا نوربخش. تهران: انتشارات سیاه‌رود.

- Bell-Berti, F., L. J. Raphael, D. B. Pisoni, & J. R. Sawusch (1979). "Some relationships between speech production and perception". *Phonetica*. 36, 373-383.
- Black, M. (1973), "Vagueness: An exercise in logic analysis". *Philosophy of science*. 4:427-455.
- Boersma, P., & D. Weenink (2017). *Praat: doing phonetics by computer* (version 6.0.28) [Computer software]. from <http://www.praat.org/>
- Buchvar, D. A. (1938). "On a three valued calculus and its application to the analysis of contradictories". *Matematicheskii Sbornik* 4(2): 287-308.
- Cox, S. J. (1990). "Hidden Markov Models for automatic speech recognition: Theory and application". *Speech and language processing*. C. Wheddon & R. Linggard (Eds.), London: Chapman and Hall, 209-230.
- Delattre, P., A. M. Liberman, F. S. Cooper, & L. Gerstman (1952). "An Experimental Study of Observation on One- and Two-Formant Vowel Synthesized from Spectrographic Patterns". *Word*. 8(3), 195-210.
- Fry, D.B., Abramson, A., Eimas, P. & Liberman, A. (1962). "The identification and discrimination of synthetic vowels". *Language and Speech*, 5, 171-189.
- Fujisaki, H. & T. Kawashima (1968). "The roles of pitch and higher formants in the perception of vowels". *IEEE transactions on audio and electro-acoustic*. AU-16, 73-77
- Hall C. (2016). "The Perception of the /a/-/ε/ Vowel Continuum in British and United States English Speakers". University of Oxford. www.academia.edu
- Harington J. (2010). "Acoustic phonetics". *The handbook of phonetic sciences*, 2, 81-129.
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy*. New York: Harper & row.
- Heyward, K. (2000), *Experimental Phonetics*. Harlow: Pearson Education.
- Hillenbrand, J., L. A. Getty, M. J. Clark, & K. Wheeler (1995). "Acoustic characteristics of American English vowels". *The Journal of the Acoustical society of America*. 97, 3099-3111.
- Klatt, D. H. (1983). "Human and automatic speech recognition". *Proceedings of the 10th International Congress of Phonetic*

- Sciences*. M. P. R. van den Broecke & A. Cohen (Eds.), Dordrecht: Foris, 183-186.
- Kleene, S. (1952). *Many-valued logic*. Stanford encyclopedia of philosophy <http://plato.stanford.edu>
- Ladefoged, P., & D. E. Broadbent (1957). "Information conveyed by vowels". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 29, 98-104.
- Ladefoged, P. & K. Johnson (2011). *A course in phonetics*. Seventh edition, Cengage learning, Standford, USA.
- Ladefoged, P. & I. Maddieson (1999). *The sounds of the world's languages*. Massachusetts: Blackwell Publishers Ltd.
- Levinson, S. E., & M. Y. Liberman (1981). "Speech recognition by computer". *Scientific American*. 244(4), 64-76.
- Luengo, I., E. Navas, & I. Hernáez (2010). "Feature analysis and evaluation for automatic emotion identification in speech". *IEEE Transactions on Multimedia*. 12(6), 490-501.
- Łukasiewicz, J. & A. Tarski, A. (1930). Untersuchungen über den Aussagenkalkül. *Comptes Rendus des Séances de la Société des Scierices et des Lettres des Varsovie Classe III*, 23, 30-50.
- McMurray, B. (2013). *KlattWorks: A [somewhat] new systematic approach to formant-based speech synthesis for empirical research*. [Computer Aplication]
- Miller, J. D. (1989). "Auditory-perceptual interpretation of the vowel". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 85, 2114-2134.
- Miller, G. A., & P. E. Nicely (1955). "An analysis of perceptual confusions among some English consonants". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 27, 338-352.
- Oosthuizen, D. & J. Hanekom (2015). "(Fuzzy Information transmission analysis for continuous speech features". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 137(4), 1983-1994.
- Pal, S. K., A. K. Datta, & D. Majumder (1978). "Adaptive learning algorithm in classification of fuzzy patterns: An application to vowels in CNC context". *International Journal of Systems Science*. 9: 887-897.
- Peterson, G. E. & H. L. Barney (1952). "Control methods used in the study of vowels". *The Journal of the Acoustical Society of America*. 24, 175-184.

- Raptis, S. & G. Carayannis (1997). "Fuzzy logic for rule-based formant speech synthesis". *EuroSpeech97 Proceedings*. Rhodes, Greece, vol. 3, 1599-1602.
- Russell, B. (1923). "Vagueness". *The Australasian Journal of Psychology and Philosophy*. 1: 84-92.
- Taleb, A. & A. Benyettou (2010). "Arabic vowels fuzzy neural network recognition". *Journal of Applied Sciences*. 10: 848-851.
- Tripathy, H. K., B. K. Tripathy, & K. Pradip (2008). "A knowledge based approach using fuzzy inference rules for vowel recognition". *Journal of Convergence Information Technology*. 3: 51-56.
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets". *Information and Control*. 8:338-353.
- Zimmermann, H.-J. (2010). "Fuzzy set theory". *WIREs Computational Statistics*. Vol. 2, Issue 3, Wiley Periodicals, Inc, 317-332.