

تأثیر تعداد واکه بر مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی و مازندرانی: پیش‌بینی کلیدی نظریه پراکندگی سازگار یافته

بتول علی‌نژاد^۱

دانشیار گروه زبان شناسی همگانی دانشگاه اصفهان

(از ص ۹۷ تا ص ۱۱۵)

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۹/۲۶؛ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۱۵

چکیده

در این مقاله اعتبار پیش‌بینی کلیدی نظریه پراکندگی سازگار یافته در مورد سازماندهی واکه‌ها بررسی شده است که براساس آن، هر چه تعداد واکه در یک نظام واکه‌ای بیشتر باشد مساحت فضای آکوستیکی جهت ایجاد تمایز ادراکی بین واکه‌ها بزرگتر می‌شود؛ بدین معنی که زبان‌هایی که دارای تعداد واکه بیشتر و همچنین بعد سازه اول وسیعتری هستند فضای واکه‌ای بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهند. جهت بررسی این فرضیه، مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی با ۶ واکه پیرامونی با فضای واکه‌ای گویش مازندرانی فریدونکناری با ۵ واکه پیرامونی مقایسه شده است. این تحقیق با استفاده از روش پاجت و تاباین (۲۰۰۵) و شاخص‌های مساحتی بکر-کریستال (۲۰۱۰) با استفاده از نرم افزار R و بسته PBSmapping نشان می‌دهد^۲ که بین تعداد واکه و مساحت فضای واکه‌ای رابطه مستقیم مثبت وجود دارد و مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی در هر چهار گروه مردان و زنان در هجاهای بی‌تکیه و تکیه‌دار از مساحت فضای واکه‌ای همه گروه‌ها در گویش مازندرانی بزرگتر است. ولی رابطه بین تعداد واکه و گستره سازه اول به اثبات نرسید. جهت مطالعه عمیق‌تر این فرضیه، سه شاخص مساحتی در دو زیرفضای پیشین و پسین نیز محاسبه شد. نتایج نشان داد که زبان فارسی در زیرفضای پسین در سه گروه بجز مردان در بافت هجاهای تکیه‌دار، گستره سازه اول بزرگتری نسبت به گویش مازندرانی دارد. بدین ترتیب تا حد زیادی پیش‌بینی نظریه تأیید شد.

واژه‌های کلیدی: نظریه پراکندگی سازگار یافته، مساحت، فضای واکه‌ای، فارسی، مازندرانی

^۱ رایانامه نویسنده مسئول: b.alinezhad@fgn.ui.ac.ir

^۲ همان‌گونه که پیرامونی (۲۰۱۰: ۴) می‌گویند این نوع مطالعه مستلزم مطالعات آماری پیچیده است. در

اینجا لازم است از خانم فریده محمدی‌نیا دانشجوی دکتر آمار دانشگاه شهید چمران اهواز برای صرف وقت و انرژی جهت میسر ساختن این تحقیق قدردانی نمایم. از خانم دکتر نسیم اسفندیاری نیز تشکر می‌نمایم که داده‌هایشان را در اختیار اینجانب قرار دادند.

۱- مقدمه

یکی از نظریه‌هایی که براساس فضای واکه‌ای به پیش‌بینی الگوی توزیع واکه‌ها و ساختار آوایی نظام‌های واکه‌ای زبان‌های جهان می‌پردازد نظریه پراکندگی سازگاریافته^۱ است. لیلین کرانتس و لیندبلاد^۲ (۱۹۷۲) و لیندبلاد (۱۹۸۶) در نظریه پراکندگی سازگاریافته به ارزیابی نقش اصل تمایز ادراکی در کیفیت نظام‌های واکه‌ای می‌پردازند که براساس آن شکل‌گیری نظام واکه‌ای در هر زبان بر اساس تمایزات ادراکی صورت می‌گیرد. بدین صورت که واکه‌ها در یک زبان به طریقی در فضای آوایی قرار می‌گیرند که بیشترین تمایز ادراکی را با واکه‌های دیگر در نظام داشته باشند. بنابراین نظام‌های دارای واکه‌های بیشتر فضای واکه‌ای خود را جهت ایجاد تمایز کافی بین واکه‌ها گسترش می‌دهند. بدین ترتیب باید بین مساحت فضای واکه‌ای و تعداد واکه رابطه مستقیم و مثبت وجود داشته باشد. البته این ارتباط در برخی زبان‌ها کاملاً تأیید نشده است که در پیشینه تحقیق به آنها خواهیم پرداخت.

این مقاله در پی پاسخگویی به این سوال است که آیا براساس پیش‌بینی کلیدی نظریه پراکندگی سازگاریافته بین مساحت فضای واکه‌ای و پیچیدگی ساختاری نظام واکه‌ای (در اینجا تعداد واکه) زبان فارسی با ۶ واکه پیرامونی و گونه فریدونکناری گویش مازندرانی با ۵ واکه پیرامونی رابطه مستقیم مثبت وجود دارد؟ بدین معنی که آیا هر چه تعداد واکه بیشتر باشد فضای واکه‌ای بزرگتر است و سوال دوم آن که آیا زبان فارسی که در حاشیه پسین خود سه واکه دارد نسبت به گونه مازندرانی فریدونکناری که در حاشیه پسین خود دو واکه دارد گستره سازه اول وسیعتری دارد؟

در این مقاله پس از ترسیم فضای واکه‌ای هجاهای تکیه‌بر و بی‌تکیه زبان فارسی و گویش مازندرانی در چهار گروه مردان و زنان براساس F1* F2 (هرینگتون، ۲۰۱۰) به مقایسه مساحت فضاهای واکه‌ای دو گونه زبانی مورد نظر می‌پردازیم. تحلیل صوت‌شناختی فضای واکه‌ای براساس روش پاجت و تاباین^۳ (۲۰۰۵) و شاخص‌های مساحتی بکر-کریستال^۴ (۲۰۱۰) انجام می‌شود.

^۱ Adaptive Dispersion Theory

^۲ J. Liljencrants & B. Lindblom

^۳ J. Padget & M. Tabain

^۴ R. Becker-Krystal

۲- پیشینه تحقیق

در مورد تأثیر تعداد واکه بر اندازه فضای واکه‌ای تحقیقات زیادی در زبان‌های مختلف انجام شده است. به‌طور مثال میلر (۱۹۸۹) به این نتیجه می‌رسد که فضای واکه‌ای زبان انگلیسی با یازده واکه و زبان آلمانی با چهارده واکه بزرگتر از فضای واکه‌ای زبان یونانی با پنج واکه است. برادلو^۱ (۱۹۹۵) در مقایسه زبان انگلیسی و اسپانیولی با پنج واکه به نتیجه مشابهی رسیده است. بکر-کریستال (۲۰۱۰) تعداد ۲۴۹ نظام واکه‌ای را بررسی می‌کند و به این نتیجه می‌رسد که اندازه فضای واکه‌ای همبستگی مستقیمی با تعداد واکه دارد. لیوین^۲ (۲۰۰۰) در چارچوب دو نظریه کوانتومی^۳ و پراکندگی سازگاریافته به بررسی ۲۸ زبان می‌پردازد و فقط در نظام‌های واکه‌ای بزرگ ۱۱ واکه‌ای و بیشتر گرایش ضعیفی به سمت بزرگتر شدن فضای واکه‌ای مشاهده می‌کند. وی با توجه به توزیع کلی واکه‌ها در نظام واکه‌ای، مکان واکه‌های کوانتومی را بسیار متغیر گزارش می‌کند که این نتیجه تأییدی برای نظریه کوانتومی نیز به‌دست نمی‌دهد. الکساندر (۲۰۱۰) حتی این پیش‌بینی کلیدی نظریه پراکندگی سازگاریافته را در مورد ۵ زبان نواختی تحقیق می‌کند؛ با این فرض که زبان‌های دارای نواخت بیشتر فضای نواختی بزرگتری دارند، ولی نتایج تحقیق تا حد زیادی این فرض را تأیید نکرد. در زبان فارسی قرائتی (۱۳۸۹) و علی‌نژاد (۱۳۹۱) در بررسی صوت‌شناختی تکیه واژگانی در زبان فارسی، فضای واکه‌ای را در حالت تکیه‌بر و بی‌تکیه مورد بررسی قرار داده‌اند. محمدی و همکاران (۱۳۹۰) و انصاریان (۲۰۰۴) صرفاً به تعیین ساختار سازه‌ای و فضای واکه‌ای در واکه‌های زبان فارسی پرداختند. همچنین مدرسی قوامی (۱۳۹۲) تأثیر تکیه واژگانی را بر ویژگی‌های کیفی واکه‌های ساده زبان فارسی بررسی کرده است. بی‌جن‌خان (۱۳۹۲) به ارائه فضای واکه‌ای در زبان فارسی براساس واحدهای مختلف هرتز، بارک و مل پرداخت تا بهترین معیار را برای نمایش فضای واکه‌ای زبان فارسی بدست دهد. اما تنها تحقیقی که رفتار واکه‌های زبان فارسی را در فضای واکه‌ای در چارچوب نظریه پراکندگی سازگاریافته بررسی کرد اسفندیاری (۱۳۹۳) است. در مطالعه مبسوط اسفندیاری (۱۳۹۳) که مطالعه‌ای تک‌زبانه و صرفاً روی زبان فارسی است در گروه زنان دامنه بسامدی سازهٔ اول در بافت تکیه‌بر در زیرفضای پسین بیشتر از دامنه بسامدی

^۱ A. Bradlow

^۲ P. Livijn

^۳Quantal Theory

سازه اول در زیرفضای پیشین گروه بی‌تکیه بوده است. ولی سازه دوم در افراد مختلف متفاوت بوده است (اسفندیاری، ۱۳۹۳: ۱۳۸). در این مقاله داده‌ها و روش تحقیق اسفندیاری (۱۳۹۳) جهت مقایسه زبان فارسی و گویش مازندرانی مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- مبانی نظری

در ارتباط با جایگاه آکوستیکی واکه‌ها در زبان‌ها دو نظریه مطرح وجود دارد. نظریه کوانتومی (استیونز ۱۹۷۲ و ۱۹۸۹) و نظریه پراکندگی سازگاریافته (لیلین کرانتس و لیندبلوم، ۱۹۷۲ و لیندبلوم ۱۹۸۶). نظریه اول بر این فرض استوار است که بین حرکت‌های تولیدی و پیامدهای آکوستیکی رابطه غیرخطی وجود دارد و پیش‌بینی می‌کند که زبان‌ها واکه‌های اصلی خود را در مناطق باثبات فضای آکوستیکی تشکیل می‌دهند. بنابراین توزیع این واکه‌های کوانتومی به اندازه فضا وابسته نیست (لیوین ۲۰۰۰). در مقابل نظریه پراکندگی سازگاریافته ادعا می‌کند که براساس اصل ادراکی تقابل کافی، واکه‌ها در یک زبان به طریقی در فضای آوایی توزیع می‌شوند که بیشترین تمایز ادراکی را با واکه‌های دیگر نظام برقرار کنند (لیندبلوم، ۱۹۸۶). براساس این اصل که از مهم‌ترین اصول نظریه پراکندگی سازگاریافته است در یک نظام واکه‌ای هر چه واکه‌ها در فاصله بیشتری از یکدیگر قرار گیرند از نظر ادراکی متمایزتر تشخیص داده می‌شوند. بنابراین هرچه تعداد واکه‌ها بیشتر باشد برای ایجاد فاصله کافی فضای واکه‌ای گسترده‌تر می‌شود. مفهوم ضمنی دیگر آن است که اضافه شدن یک واکه به حاشیه پیشین یا پسین موجب بزرگتر شدن گستره آن حاشیه می‌شود؛ بدین معنی که گستره بسامدی سازه اول با تعداد واکه‌های پیرامونی و گستره بسامدی سازه دوم با تعداد واکه‌های غیرپیرامونی نظام واکه‌ای زبان همبستگی دارد (بکر-کریستال، ۲۰۱۰: ۱۱۳).

در پیش‌بینی دوم نظریه پراکندگی سازگاریافته رفتار توافقی واکه‌ها در نظام‌های واکه‌ای در نتیجه پیچیدگی ساختاری (تعداد واکه) در سه بخش رفتار واکه افتاده، رفتار واکه‌های افراشته و رفتار واکه‌های میانی بررسی می‌شود (بکر-کریستال، ۲۰۱۰: ۱۲۲).

پیش‌بینی سوم نیز بر این اصل استوار است که واکه‌ها در یک نظام واکه‌ای به طریقی قرار می‌گیرند که بیشترین فاصله میان واکه‌های آن نظام حاصل شود. بیشینه بودن پراکندگی معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که واکه‌ها در فواصل مساوی از هم قرار گیرند (بکر-کریستال، ۲۰۱۰: ۱۵۵). در این مقاله به منظور بررسی اولین پیش‌بینی نظریه

پراکندگی، یعنی ارتباط مستقیم مثبت بین تعداد واکه‌ها و بزرگی فضای واکه‌ای در دو نظام واکه‌ای زبان فارسی و گونهٔ فریدونکناری گویش مازندرانی همبستگی میان شاخصه‌های مساحتی فضای آکوستیکی و پیچیدگی ساختاری نظام واکه‌ای (تفاوت در تعداد واکه) مقایسه می‌شود. شاخصه‌های مساحتی فضای واکه‌ای براساس بکر-کریستال (۲۰۱۰: ۱۱۵) سه متغیر است: الف: مساحت نمودار چندضلعی (area) ب: گسترهٔ سازهٔ اول یا $F1_{span}$ و ج: گسترهٔ سازهٔ دوم یا $F2_{span}$. به‌طور مثال اگر تفاضل بیشینه بسامد سازهٔ اول واکه /u/ از کمینه بسامد سازهٔ اول واکه /ɒ/ محاسبه شود گسترهٔ سازهٔ اول یعنی ضلع پسین چند ضلعی به‌دست می‌آید و برای محاسبه گسترهٔ سازهٔ دوم نیز تفاضل بسامد بیشینه و کمینه واکه‌های /u/ و /i/ محاسبه می‌شود. دو ضلع دیگر نیز به همین ترتیب با توجه به واکه‌هایی که در دو انتهای اضلاع مورد نظر قرار دارند محاسبه می‌شود. در این مقاله علاوه بر مساحت کل فضای واکه‌ای دو گونهٔ زبانی، مساحت دو زیرفضای^۱ پسین و پیشین آنها نیز محاسبه می‌شود. منظور از زیرفضا تقسیم فضای چند ضلعی به دو بخش پیشین و پسین است. مساحت هر بخش با توجه به وجود تعداد واکه در هر حاشیهٔ چند ضلعی به‌دست می‌آید. بدین ترتیب پیش‌بینی می‌شود که مساحت زیرفضای پسین زبان فارسی با سه واکه /u-ɒ-ɒ/ از زیرفضای پسین گونهٔ مازندرانی فریدونکناری با دو واکه /u-ɒ/ بزرگتر باشد و زیرفضای پیشین در هر دو گونهٔ زبانی که دارای دو واکهٔ پیشین /i-e/ هستند مساوی باشد. جدول ۱ شاخصه‌های سه‌گانهٔ بکر-کریستال (۲۰۱۰: ۱۱۶) را در مورد چند نظام واکه‌ای نشان می‌دهد:

جدول ۱ شاخصه‌های مساحتی در زبان‌های سه تا چهارده واکه‌ای

V	entries	area	F1 _{SPAN}	F2 _{SPAN}	V	entries	area	F1 _{SPAN}	F2 _{SPAN}
3	20	13.52±5.52	275±64	1075±234	3-4	35	15.88±7.16	296±85	1109±239
4	15	19.03±8.04	323±103	1154±245					
5	55	27.83±10.00	389±80	1318±223	5-6	105	28.26±9.14	395±77	1330±209
6	50	28.73±8.16	401±74	1343±194					
7	62	34.11±9.95	434±71	1395±213	7-9	126	34.46±9.39	431±72	1408±204
8	28	34.62±7.55	418±64	1449±174					
9	36	34.92±9.92	435±81	1397±213					
	(25)	(36.49±9.72)	(434±85)	(1443±209)	10-14	38	36.28±9.62	446±67	1429±189
10	24	34.60±8.60	450±71	1385±168					
	(16)	(35.96±9.50)	(452±78)	(1425±151)	11	7	34.47±8.74	414±59	1431±226
11	7	34.47±8.74	414±59	1431±226					
12-14	7	43.65±11.36	464±57	1573±174					

¹subspaces

لازم به ذکر است که واکه /a/ در هر دو گونه زبانی افتاده است و در زیرفضای پیشین و زیرفضای پسین قرار نمی‌گیرد. اسفندیاری (۱۳۹۳) نیز واکه افتاده پیشین فارسی را افتاده در نظر گفته است که در هیچیک از زیرفضاهای پیشین و پسین قرار نمی‌گیرد.

۴- روش تحقیق

۴-۱ نحوه جمع‌آوری داده‌ها

قبلاً گفته شد که جهت داده‌های زبان فارسی از تحقیق اسفندیاری (۱۳۹۳) استفاده شده است. وی داده‌های خود را از ضبط ۵ ساعت صدای ده گوینده اخبار (پنج زن، پنج مرد) از شبکه سراسری سیما جمهوری اسلامی ایران گویندگان اخبار تلویزیون در سال ۱۳۹۲ بدست آورد چون سبک اخبار با صدای گویندگان حرفه‌ای می‌تواند سرنخ‌های صوت‌شناختی را به صورت واضح‌تر و منسجم‌تر با حفظ درجه طبیعی بودن گفتار نسبت به سبک غیرحرفه‌ای نمایش دهد. مطالعات پترسون و بارنی (۱۹۵۲) و پرایس (۲۰۰۲) در مورد انتخاب نوع داده جهت بررسی همبسته‌های اکوستیکی بر اعتبار سبک اخبار دلالت دارد. ضبط صدا نیز از طریق USB به صورت مستقیم از تلویزیون انجام شد. بدین ترتیب نوفه محیط تأثیری در ضبط داده‌ها نداشت.

اما داده‌های گویش مازندرانی فریدونکناری که در ده کیلومتری بابلسر صحبت می‌شود از ضبط صدای ۴ مرد و ۴ زن ۴۰ تا ۶۰ ساله بومی منطقه در سال ۱۳۹۳ بدست آمده است. این گونه مازندرانی واکه پسین میانی /o/ ندارد و همه کلماتی که در فارسی با واکه میانی پسین بیان می‌شوند در این گونه بیشتر با واکه /e/ و کمتر با واکه /u/ و در موارد نادر با واکه‌های دیگر بیان می‌شوند، مانند بلبل که به صورت [belbel] و کهنه به صورت [kune] تلفظ می‌شوند. کرد زعفرانلو کامبوزیا (۱۳۸۵: ۴۱۹) نیز نبود این واکه را در برخی از گونه‌های مازندرانی گزارش می‌دهد. لازم است ذکر شود که نسل جدید تحت تأثیر زبان فارسی در برخی کلمات واکه /o/ را تلفظ می‌کنند. به منظور تعیین جایگاه واکه‌های پسین این گونه زبانی در نبود واکه /o/ نحوه جمع‌آوری داده به صورت نیمه هدایت شده انجام شد بدین معنی که کلماتی به گویشوران داده شد که در فارسی دارای واکه /o/ هستند ولی در گونه فریدونکناری با واکه‌های دیگر تلفظ می‌شود و از آنها خواسته شد که در مورد کلمات ذکر شده صحبت کنند. ۴ ساعت گفتار طبیعی آنها با استفاده از دستگاه ضبط Sony SX 68 در

محیطی کاملاً آرام در شهر فریدونکنار ضبط شد. در ضمن از نرم افزار NCH Suite جهت حذف نوفه محیط استفاده شد. در تحقیق اسفندیاری و این تحقیق، جهت استخراج بسامد سازه‌ها میانگین بخش میانی واکه که دارای ثبات اکوستیکی است در نرم‌افزار پرات به صورت دستی اندازه‌گیری شد. در هر دو تحقیق بسامد دو سازه اول واکه‌ها در موضع تکیه‌دار و بی‌تکیه اسم‌ها و صفات دو تا سه هجایی اندازه‌گیری شده است. تکیه در این گویش در اسم‌ها و صفات مانند زبان فارسی بر هجای آخر قرار می‌گیرد. در ضمن واژه‌هایی که در حالت تأکید بیان شده بودند و یا واکه آنها آنقدر کوتاه بیان شده بود که به واکه هدف^۱ خود نرسیدند کنار گذاشته شدند.

۴-۲ محاسبه شاخصه‌های دامنه و مساحت فضای واکه‌ای

جهت بررسی مساحت فضای واکه‌ای از روش مقایسه میانگین شاخص‌های مساحت فضای واکه‌ای و گستره بسامدی در چهار گروه یعنی تلفظ مردان و زنان در موضع تکیه‌دار و بی‌تکیه فارسی و گویش مازندرانی استفاده شده است. لازم است ذکر شود که در این نوع مطالعات معمولاً از روش بهنجارسازی^۲ استفاده می‌شود تا بتوانند متغیرهای مختلف فیزیولوژیکی مانند طول مجرای صوتی و جنسیت گویندگان را حذف کنند. ولی زمانی که تعداد شرکت‌کنندگان کم باشد بهنجارسازی به صورت نادرستی فضای بزرگتری را ارائه می‌دهد. به همین دلیل چون تعداد گویشوران این تحقیق بسیار محدود بوده است از روش میانگین‌گیری پاجت و باین (۲۰۰۵) جهت محاسبه مساحت فضای سازه‌ها استفاده شده است. اسفندیاری (۱۳۹۳) نیز که ده گوینده داشته است از همین روش برای اندازه‌گیری مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی استفاده کرده است. بدین ترتیب زمینه مناسبی جهت مقایسه این دو گونه زبانی فراهم می‌شود.

جهت حذف داده‌های پرت از معیار فاصله ماهالانوبیس^۳ (۱۹۳۶) استفاده شده است که زمانی که داده‌ها دو بعدی باشند این معیار بکار می‌رود. منظور از داده پرت به لحاظ آماری، تعداد محدودی از داده‌هاست که نسبت به توزیع عادی واکه‌ها ناهماهنگ و از بقیه مشاهدات دور و غیرطبیعی باشند. در این تحقیق نیز چون واکه‌ها دارای دو بعد سازه اول و سازه دوم هستند براساس این معیار اگر هر دو بعد یک واکه پرت باشد آن را

^۱ undershoot

^۲ normalization

^۳ mahalanobis distance

مشخص می‌کند. فاصله ماهالانوبیس احتمال توزیع را محاسبه و فاصله اقلیدسی را در توزیع نرمال استاندارد یکسان می‌کند. این بدان معنی است که همه مشاهدات X به اندازه فاصله اقلیدسی از مرکز فاصله دارند. این فاصله با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود:

معادله (۱)

$$D_M(x) = \sqrt{(x - \mu)^T S^{-1} (x - \mu)}.$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)^T$$

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N)^T$$

دامنه بسامدی فضای واکه‌ای به روش پاجت و تاباین (۲۰۰۵)، حاصل جمع بیشینه بسامد سازه اول با میزان انحراف استاندارد و حاصل افتراق کمینه بسامد سازه اول و میزان انحراف استاندارد برای هر گوینده است. در داده‌های زبان فارسی و گونه‌های مازندرانی مانند سایر زبان‌ها بیشینه میزان بسامد سازه اول برای واکه [a] و کمینه میزان بسامدی سازه اول برای واکه [i] بدست آمده است. در مورد بسامد سازه دوم نیز مقدار بیشینه معمولاً برای واکه [i] و کمینه برای واکه [u] بدست می‌آید و گستره بسامدی، حاصل جمع مقدار بیشینه و انحراف استاندارد و حاصل افتراق کمینه و انحراف استاندارد است و بدین طریق مقادیر min و max مشخص می‌شود که از حاصل افتراق این دو متغیر در هر گروه سازه‌ای، گستره فضای واکه‌ای تعیین می‌گردد که با نماد diff نشان داده می‌شود. علت استفاده از میزان انحراف استاندارد این است که بوسیله آن می‌توان تناسب دقیق میزان توزیع داده‌ها را بدون در نظر گرفتن داده‌های پرت بدست آورد.

جهت محاسبه مساحت فضاهای واکه‌ای چند ضلعی در داده‌ها از نرم افزار R، با استفاده از بسته PBSmapping استفاده گردیده است. در این بسته برای محاسبه مساحت چندضلعی از معادله (۲) استفاده می‌شود (رکنه^۱، ۱۹۹۶):

معادله (۲)

در این معادله، n به تعداد زوایای چند ضلعی و $X_i Y_i$ به بسامد سازه اول و دوم زوایای چندضلعی اشاره دارد.

^۱ J. Rokne

روش محاسبه گستره بسامد سازهای اول و دوم نیز از رابطه ۳ و ۴ به دست می‌آید (بکر-کریستال، ۲۰۱۰: ۵۸):

معادله (۳)

$$F1_{span} = F1 \text{ maximum value} - F1 \text{ minimum value}$$

معادله (۴)

$$F2_{span} = F2 \text{ maximum value} - F2 \text{ minimum value}$$

بدین ترتیب گستره سازه اول $F1_{span}$ و انحراف استاندارد سازه اول $F1_{SD}$ و گستره سازه دوم $F2_{span}$ و انحراف استاندارد سازه دوم $F2_{SD}$ محاسبه می‌شود. در ضمن در بکر-کریستال (۲۰۱۰) انحراف استاندارد با \pm پس از میزان گستره سازه آمده است. لازم به ذکر است که در گونه مازندرانی ۴ مرد و ۴ زن شرکت داشته‌اند که براساس فاصله ماهالانوبیس به دلیل پرت بودن بسامد دو بعدی سازه‌ها، دو نفر از گروه مردان مازندرانی و یک نفر از گروه زنان مازندرانی حذف شدند. در نهایت مقایسه فضای واکه‌ای به تفکیک چهار گروه زیر انجام شده است:

گروه‌های زنان بافت تکیه‌دار در فارسی ۵ نفر و در گویش مازندرانی ۳ نفر
گروه‌های زنان بافت بی‌تکیه در فارسی ۵ نفر و در گویش مازندرانی ۳ نفر
گروه‌های مردان بافت تکیه‌دار در فارسی ۵ نفر و در گویش مازندرانی ۲ نفر
گروه‌های مردان بافت بی‌تکیه در فارسی ۵ نفر و در گویش مازندرانی ۲ نفر

۵- تحلیل داده‌ها

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد شاخصه‌های مساحتی فضای واکه‌ای براساس بکر-کریستال (۲۰۱۰: ۱۱۵) عبارتند از: الف: مساحت نمودار چندضلعی ب: گسترده سازه اول یا $span$ و ج: گسترده سازه دوم یا $F2_{span}$. این متغیرها ابتدا در کل فضا و در بخش بعد در دو زیرفضای پسین و پیشین محاسبه می‌گردد.

۵-۱ محاسبه شاخصه‌های مساحتی کل فضای واکه‌ای در دو گونه زبانی

براساس پیش‌بینی نظریه انتظار داریم که مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی به دلیل وجود ۶ واکه پیرامونی بزرگتر از مساحت فضای واکه‌ای گویش مازندرانی با ۵ واکه بدست آید. در جدول ۲ مقادیر گستره $F1$ ، گستره $F2$ ، $diff.F1$ ، $diff.F2$ و مساحت در گروه مردان و زنان به تفکیک بافت‌های تکیه‌دار و بی‌تکیه در فارسی و گویش مازندرانی براساس فضاهای هم‌مرکز شده آمده است:

جدول ۲ میانگین مقادیر گروه مردان و زنان در بافت بدون تکیه و تکیه‌دار در دو گونه زبانی

گوش	جنس	بافت	گستره F ₁	گستره F ₂	مساحت	diff.F ₁	diff.F ₂
مازنی	مرد	تکیه‌دار	۵۲۹ ±۱۴	۱۱۸۶ ±۸۴	۱۶۸۷۹۹/۹ ±۱۴۴۴۰	۴۰۸/۹۸ ±۲۹	۹۲۴/۱۴ ±۶۵
مازنی	مرد	بی تکیه	۵۵۴ ±۶۵	۱۱۶۷ ±۱۳۲	۱۸۲۵۵۷/۹ ±۴۸۴۷۰	۴۷۱/۹۷ ±۷۳	۱۰۱۸/۱۳ ±۱۷۲
مازنی	زن	تکیه‌دار	۶۹۵/۳۳ ±۶۵	۱۵۳۶/۳۳ ±۱۷۸	۳۵۸۰۳۹ ±۱۲۶۷۹۲	۵۴۵/۸۸ ±۱۰۳	۱۲۲۳/۳۴ ±۱۸۱
مازنی	زن	بی تکیه	۶۴۱/۶۷ ±۱۷	۱۳۷۰ ±۲۲۴	۲۱۸۳۰۰/۸ ±۶۵۲۳۸	۵۳۳/۷۸ ±۵۹	۱۲۰۱/۰۸ ±۱۹۰
فارسی	مرد	تکیه‌دار	۴۳۲/۸ ±۲۳	۱۵۵۱ ±۱۰۵	۲۸۲۷۴۱/۷ ±۳۸۷۷۸	۳۷۷/۶۶ ±۳۱	۱۳۶۳/۷۹ ±۸۷
فارسی	مرد	بی تکیه	۴۷۲/۲۰ ±۲۳	۱۴۳۵/۸۰ ±۱۰۲	۲۸۰۱۹۰/۳ ±۳۲۳۱۲	۴۱۸/۶۷ ±۱۴	۱۲۸۳/۲۵ ±۵۱
فارسی	زن	تکیه‌دار	۵۵۸/۶ ±۴۳	۱۵۱۴ ±۱۹۱	۴۴۵۵۴۵/۴ ±۶۶۶۵۷	۴۶۵/۰۵ ±۳۷	۱۳۸۹/۱۹ ±۲۰۸
فارسی	زن	بی تکیه	۶۰۱/۴ ±۳۵	۱۶۵۵/۸ ±۵۳	۴۹۴۴۷۰/۷ ±۳۸۳۳۸	۵۲۸/۱۹ ±۲۳	۱۴۴۷/۸۴ ±۷۲

از جدول ۲ نتایج زیر در مورد مقایسه اندازه فضای واکه‌ای در دو گونه زبانی بدست می‌آید:

- ۱- میانگین مساحت فضا در گروه مردان مازندرانی بافت تکیه‌دار ۱۶۸۷۹۹/۹ هرتز مربع ولی در مردان تکیه‌دار فارسی ۲۸۲۷۴۱/۷ هرتز مربع است.
- ۲- میانگین مساحت فضا در گروه مردان مازندرانی بافت بی تکیه ۱۸۲۵۵۷/۹ هرتز مربع است ولی در گروه مردان بافت بی تکیه فارسی ۲۸۰۱۹۰/۳ هرتز مربع است.
- ۳- میانگین مساحت فضا در گروه زنان بافت تکیه‌دار مازندرانی ۳۵۸۰۳۹ هرتز مربع است ولی در زنان بافت تکیه‌دار فارسی ۴۴۵۵۴۵/۴ هرتز مربع است.
- ۴- میانگین مساحت فضا در گروه زنان بافت بی تکیه مازندرانی ۲۱۸۳۰۰/۸ هرتز مربع است ولی در گروه زنان بافت بی تکیه فارسی ۴۹۴۴۷۰/۷ هرتز مربع است.

بدین ترتیب مشاهده می‌شود که مساحت فضای واکه‌ای در هر چهار گروه مردان و زنان در بافت‌های تکیه‌دار و بی‌تکیه‌زبان فارسی بزرگتر از مساحت فضای واکه‌ای در گروه‌های مشابه گویش مازندرانی است.

بر اساس نظریه باز هم انتظار داریم که گستره سازه اول در حاشیه پسون در زبان فارسی به دلیل حضور سه واکه پسون بیشتر از گویش مازندرانی با دو واکه پسون باشد. نتایج زیر در مورد مقایسه گستره سازه اول در دو گونه زبانی بر اساس جدول ۲ بدست می‌آید:

۱- میانگین مقادیر گستره سازه اول در گروه مردان بافت تکیه‌دار مازندرانی ۵۲۹ هرتز است ولی در مردان بافت تکیه‌دار فارسی ۴۳۲/۸ است.

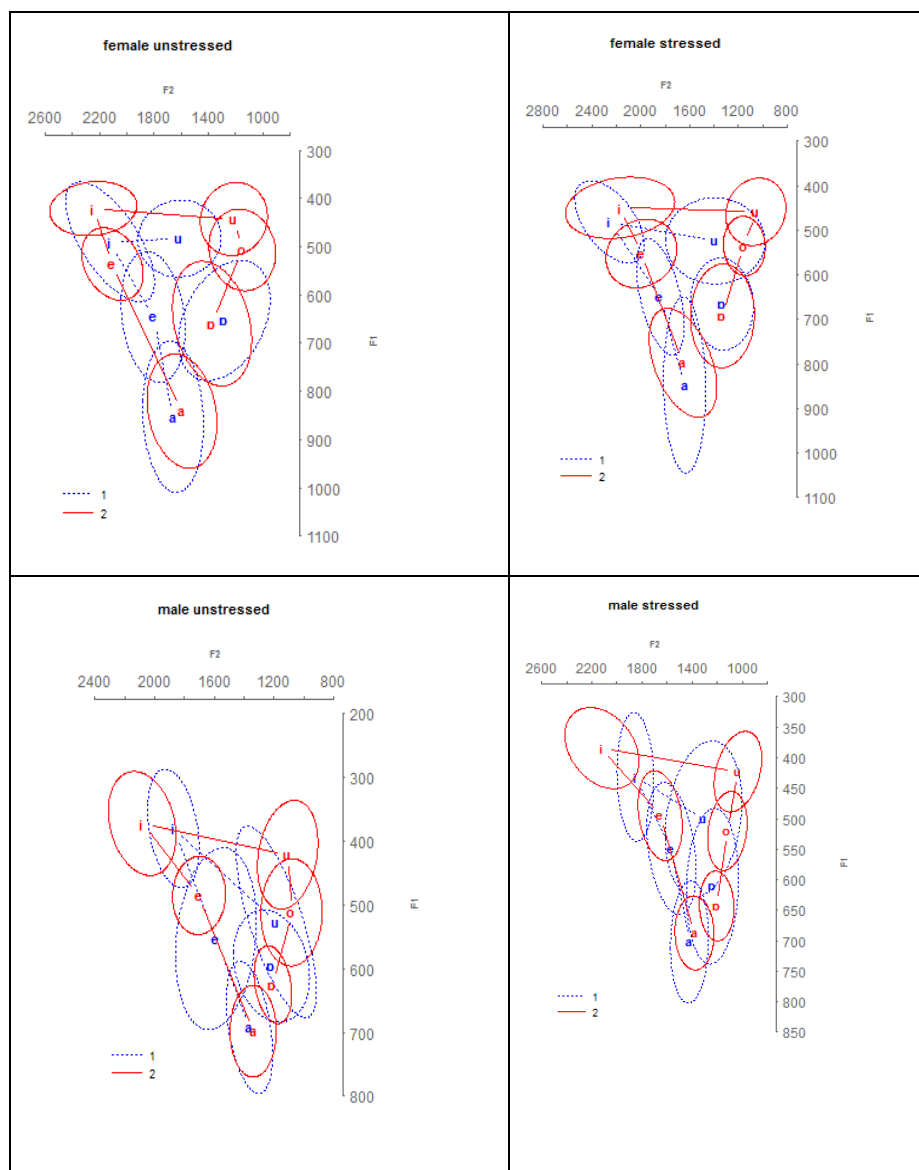
۲- میانگین مقادیر گستره سازه اول در گروه مردان بافت بی‌تکیه مازندرانی ۵۵۴ هرتز است ولی در گروه مردان بافت بی‌تکیه‌دار فارسی ۴۷۲/۲ است.

۳ - میانگین مقادیر گستره سازه اول در گروه زنان بافت تکیه‌دار مازندرانی ۶۹۵/۳۳ هرتز است ولی در زنان بافت تکیه‌دار فارسی ۵۵۸/۶ است.

۴- میانگین مقادیر گستره سازه اول در گروه زنان بافت بی‌تکیه مازندرانی ۶۴۱/۶۷ هرتز است ولی در گروه زنان بافت بی‌تکیه‌دار فارسی ۶۰۱/۴ است.

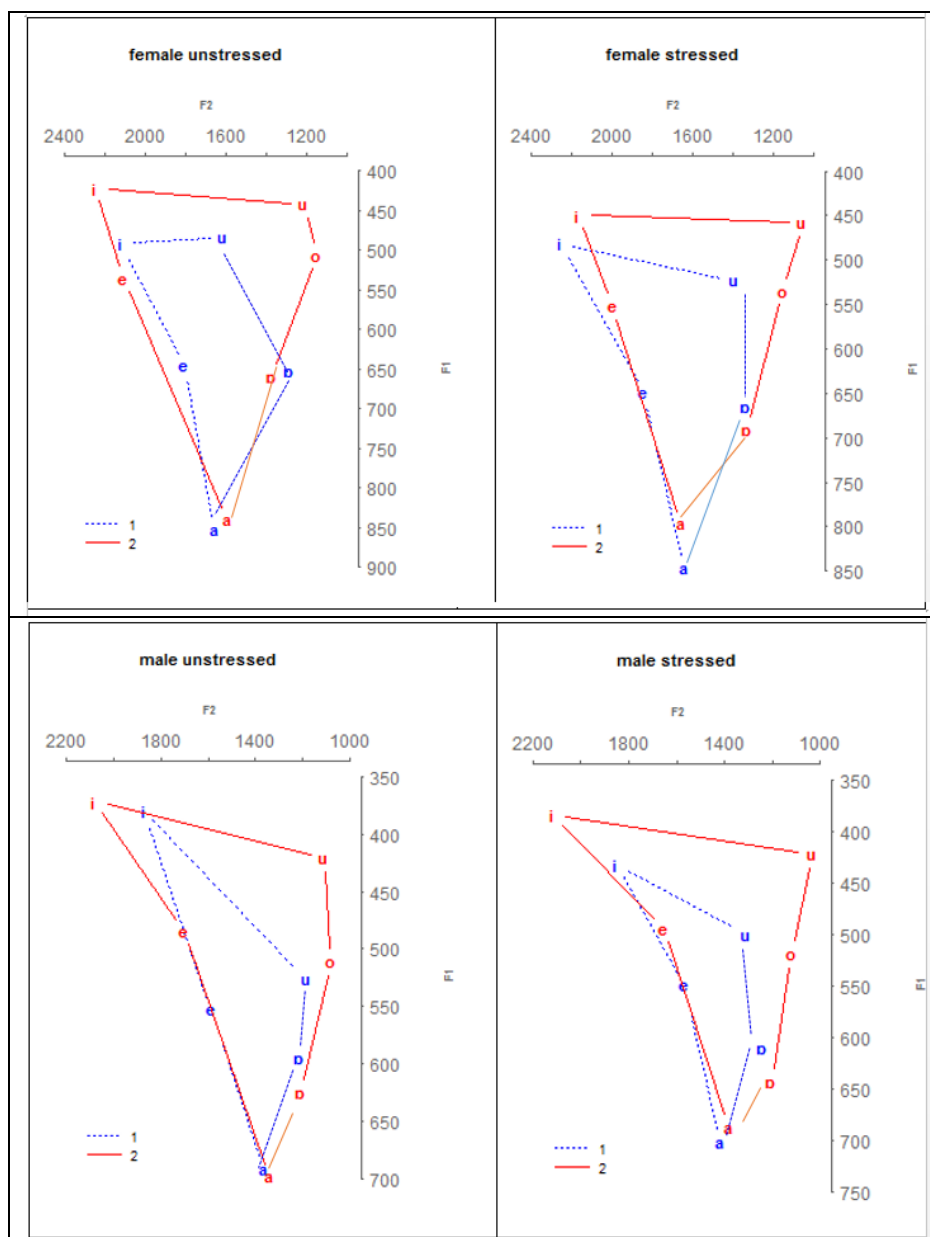
بدین ترتیب مشخص می‌شود که گستره سازه اول فضای واکه‌ای در هر چهار گروه مردان و زنان در بافت‌های تکیه‌دار و بی‌تکیه‌زبان فارسی کوچکتر از گستره سازه اول فضای واکه‌ای در گروه‌های مشابه گویش مازندرانی است. در نتیجه پیش‌بینی نظریه در رابطه با گستره سازه اول تأیید نمی‌شود.

در شکل ۱ نمودار فضای واکه‌ای گستره سازه اول برای گروه مردان و زنان به تفکیک بافت تکیه‌دار و بدون تکیه در زبان فارسی و گویش مازندرانی براساس بیضی‌گون اطمینان رسم شده است که نشان می‌دهد ۹۵ درصد مشاهدات سازه‌های اول و دوم واکه‌ها در چه گستره‌ای تولید شده‌اند. خطوط پیوسته تیره فضای واکه‌ای زبان فارسی و خطوط نقطه‌چین کم‌رنگ فضای واکه‌ای مازندرانی را نشان می‌دهد. بدین ترتیب کوچکتر بودن فضای واکه‌ای در گویش مازندرانی فریدونکناری نسبت به زبان فارسی آشکار است ولی گستره سازه اول در حاشیه پسون زبان فارسی با سه واکه نسبت به حاشیه پسون گونه فریدونکناری گویش مازندرانی با دو واکه چنین ارتباطی را نشان نمی‌دهد و برخلاف انتظار گویش مازندرانی دارای گستره سازه اول بزرگتری است.



شکل ۱ مقایسه فضای واکهای در ۴ گروه زبان فارسی و گویش مازندرانی

نمودار فضای واکهای براساس اتصال مرکز بیضی‌گون اطمینان واکه‌ها در شکل ۲ ترسیم شده است.



شکل ۲ مقایسه فضای واکه‌ای در ۴ گروه زبان فارسی و گویش مازندرانی بر اساس اتصال مرکز بیضی‌گون‌ها به هم. جهت اطمینان بیشتر در بخش بعد محاسبات در دو زیرفضای پیشین و پسین در دو گونه زبانی انجام می‌شود تا رابطه اندازه طول حاشیه‌های دو طرف فضای واکه‌ای با تعداد واکه در آن حاشیه بررسی شود.

۵-۲ محاسبه شاخصه‌های مساحتی در زیر فضاهای پیشین و پسین

داده‌های هر گروه در دو زیرفضای پسین و پیشین نیز محاسبه و هم‌مرکز شده‌اند؛ به‌طوری‌که مرکز فضاهای واکه‌ای افراد یک گروه بر هم منطبق شده است. فرض تحقیق این است که چون زبان فارسی در حاشیهٔ پسین خود سه واکه را جای داده است باید دارای زیرفضای پسین بزرگتری نسبت به گویش مازندرانی باشد که دو واکهٔ پسین دارد. ولی چون هر دو گونهٔ زبانی در زیرفضای پیشین خود دو واکه دارند و واکه /a/ در هر دو گونهٔ زبانی افتاده است گسترهٔ سازهٔ اول نباید تفاوت چندانی داشته باشد. جدول ۳ مقادیر شاخصه‌های مساحتی مورد نظر را در زیرفضای پسین نشان می‌دهد:

جدول ۳ مقادیر شاخصه‌های مساحتی در زیر فضاهای پسین فارسی و مازندرانی

گوش	جنس	بافت	گسترهٔ F ₁	گسترهٔ F ₂	مساحت	diff.F ₁	diff.F ₂
مازنی	مرد	تکیه‌دار	۴۱۰/۵	۷۶۹	۱۰۹۸۸۰/۶۳	۲۸۳/۵۳	۴۰۴/۲۵
مازنی	مرد	بی‌تکیه	۳۱۷/۵	۶۰۵	۹۶۳۷۲/۲۳	۲۱۸/۳۸	۴۲۹/۶۹
مازنی	زن	تکیه‌دار	۳۹۰/۶۷	۷۹۰/۳۳	۱۲۷۷۳۲/۷۴	۲۶۶/۰۱	۴۶۰/۲۹
مازنی	زن	بی‌تکیه	۳۷۶/۳۳	۸۷۳/۶۷	۱۷۷۰۵۵/۳۳	۲۸۶/۵۹	۷۱۹/۷۴
فارسی	مرد	تکیه‌دار	۳۳۱/۴۰	۴۸۹/۴۰	۶۷۰۰۲/۶۷	۲۹۷/۱۹	۳۶۳/۷۰
فارسی	مرد	بی‌تکیه	۳۵۰	۵۲۱/۴۰	۸۷۶۲۷/۱۴	۲۹۵/۵۰	۳۳۹/۹۰
فارسی	زن	تکیه‌دار	۴۱۶/۸۰	۷۲۹/۸۰	۱۳۴۷۰۸/۸۷	۳۵۰/۸۸	۵۸۲/۶۳
فارسی	زن	بی‌تکیه	۴۴۷	۸۲۸	۱۵۳۴۲۹/۶۶	۳۵۰/۸۳	۵۵۶/۸۷

با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود که:

- ۱- گسترهٔ بسامدی سازهٔ اول در زیرفضای پسین در گروه مردان بافت تکیه‌دار فارسی ۳۳۱/۴۰ هرتز و در گویش مازندرانی در گروه مشابه ۴۱۰/۵ هرتز است.
- ۲- گسترهٔ بسامدی سازهٔ اول در زیرفضای پسین در گروه مردان بافت بی‌تکیه فارسی ۳۵۰ هرتز و در گروه مشابه مازندرانی ۳۱۷/۵ هرتز است.

۳- همچنین گروه زنان بافت تکیه‌دار فارسی ۴۱۶/۸۰ هرتز و گروه مشابه در مازندرانی ۳۹۰/۶۷ است.

۴- همچنین گروه زنان بافت بی‌تکیه فارسی ۴۴۷ هرتز و گروه زنان بافت بی‌تکیه مازندرانی ۳۷۶/۳۳ است.

بدین ترتیب در سه گروه، بجز گروه مردان بافت تکیه‌دار، گستره بسامدی سازه اول در زیرفضای پسین زبان فارسی بزرگتر است.

در جدول ۴ مقادیر شاخصه‌های مساحتی در زیرفضاهای پیشین فارسی و گویش مازندرانی آمده است:

جدول ۴ مقادیر شاخصه‌های مساحتی در زیرفضاهای پیشین فارسی و مازندرانی

گوش	جنس	بافت	گستره F ₁	گستره F ₂	مساحت	diff.F ₁	diff.F ₂
مازنی	مرد	تکیه‌دار	۳۴۹	۶۸۷/۵۰	۸۶۴۶۷/۴۷	۲۶۳/۳۵	۵۲۳/۵۳
مازنی	مرد	بی‌تکیه	۵۴۷/۵	۸۴۵/۵۰	۱۴۰۶۶۳/۹۴	۳۳۲/۷۹	۵۸۳/۰۱
مازنی	زن	تکیه‌دار	۳۹۰/۶۷	۷۹۰/۳۳	۱۲۷۷۳۲/۷۴	۲۶۶/۰۱	۴۶۰/۲۹
مازنی	زن	بی‌تکیه	۴۸۴	۹۲۷	۱۱۵۷۹۶/۱۸	۳۱۵/۲۰	۶۴۳/۳۴
فارسی	مرد	تکیه‌دار	۲۵۵/۲۰	۹۶۶/۶۰	۹۳۹۱۷/۴۴	۱۹۴/۸۹	۷۵۶/۴۰
فارسی	مرد	بی‌تکیه	۲۵۲/۴۰	۷۹۰/۸۰	۸۲۹۸۶/۰۴	۲۰۵/۳۵	۶۲۲/۶۲
فارسی	زن	تکیه‌دار	۲۶۳/۶۰	۸۳۳/۸۰	۱۰۹۴۹۲/۵۰	۱۹۷/۸۰	۶۰۳/۵۸
فارسی	زن	بی‌تکیه	۲۶۱	۶۹۸/۶۰	۸۵۶۴۹/۵۱	۱۹۶/۴۵	۵۰۹/۳۳

با توجه به جدول ۴ مشخص می‌شود که:

۱- گستره بسامدی سازه اول در زیرفضای پیشین در گروه مردان بافت تکیه‌دار فارسی ۲۵۵/۲۰ هرتز و در گویش مازندرانی در گروه مشابه ۳۴۹ هرتز است.

۲- گستره بسامدی سازه اول در زیرفضای پیشین در گروه مردان بافت بی‌تکیه فارسی ۲۵۲/۴۰ هرتز و در گروه مشابه مازندرانی ۵۴۷/۵ هرتز است.

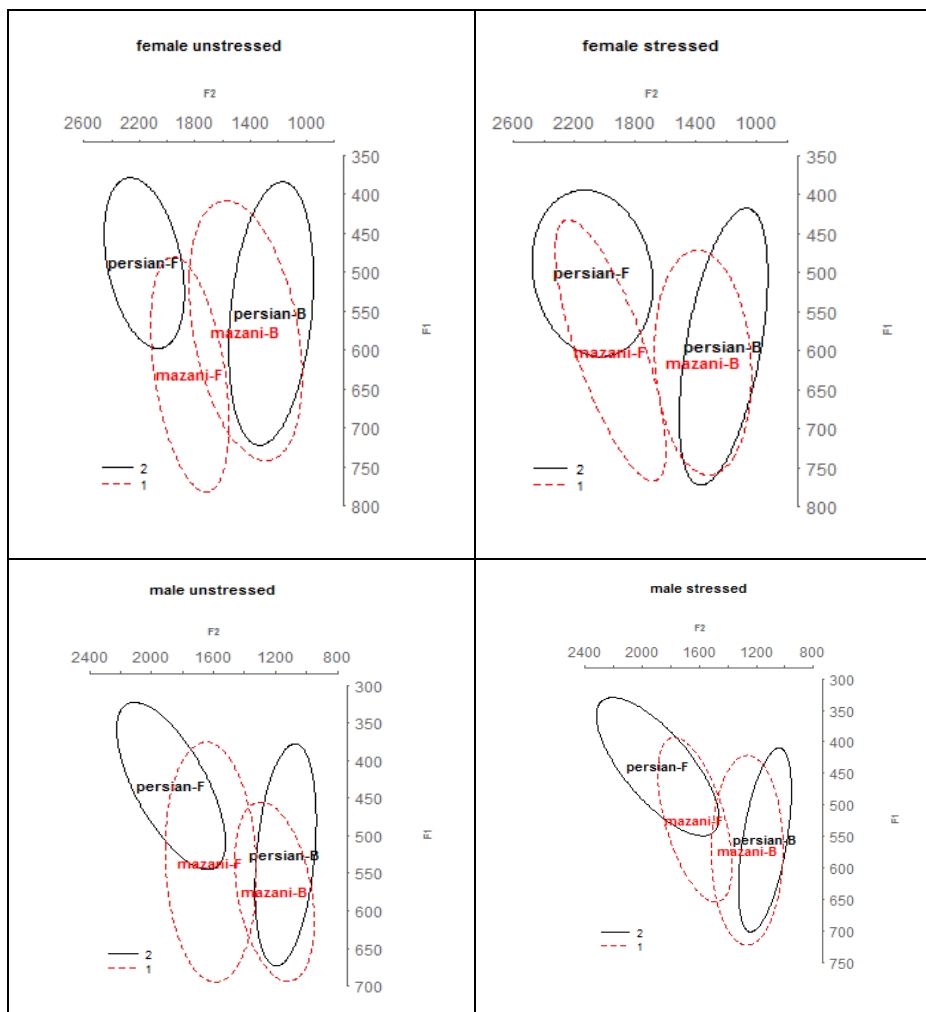
۳- گستره بسامدی سازه اول در گروه زنان بافت تکیه‌دار فارسی ۲۶۳/۶۰ هرتز و گروه مشابه در مازندرانی ۳۹۰/۶۷ است.

۴- همچنین گستره بسامدی سازه اول گروه زنان بافت بی‌تکیه فارسی ۲۶۱ هرتز و گروه زنان بافت بی‌تکیه مازندرانی ۴۸۴ است.

همان‌گونه که مشخص است گستره بسامدی سازه اول در زیرفضای پیشین در گویش مازندرانی در هر ۴ گروه بیشتر از زبان فارسی است.

مساحت زیرفضای واکه‌ای پیشین فقط در گروه مردان تکیه‌دار فارسی ۹۳۹۱۷/۴۴ هرتز است که از گروه مردان تکیه‌دار مازندرانی با مساحت ۸۶۴۶۷/۴۷ هرتز بیشتر است. در سایر گروه‌ها گویش مازندرانی فضای بیشتری را در حاشیه پیشین به خود اختصاص داده است.

براساس دو جدول ۳ و ۴ نمودار زیرفضای پیشین و پسین در دو گونه زبانی در شکل ۳ رسم شده است. با توجه به شکل ۳ می‌توان گروه‌های مختلف را در دو گونه زبانی با هم مقایسه کرد. به‌طور مثال در فضای واکه‌ای تلفظ زنان در هجاهای تکیه‌دار زیرفضای پسین، زبان فارسی نسبت به گونه مازندرانی بعد سازه اول گسترده‌تری دارد و با توجه به جدول ۳ مساحت زیرفضای زبان فارسی ۱۳۴۷۰۸/۸۷ هرتز مربع است در مقابل زیرفضای پسین گویش مازندرانی در گروه مشابه ۱۲۷۷۳۲/۷۴ هرتز مربع است. بنابراین در این گروه فرض بزرگتر بودن حاشیه پسین زبان فارسی با داشتن سه واکه در حاشیه مذکور تأیید می‌شود. اما در زیرفضای پیشین بعد سازه اول در گویش مازندرانی بیشتر ولی در حوزه بسامدی پایین‌تری نسبت به زبان فارسی قرار دارد و زبان فارسی دارای گستردگی بیشتری در بعد سازه دوم است. مساحت زیر فضای پیشین زبان فارسی ۱۰۹۴۹۲/۵۰ ولی مساحت زیر فضای پیشین گویش مازندرانی ۱۱۷۹۳۱/۳۹ هرتز مربع است. در نتیجه فرض ما در حاشیه پیشین دو زبان تأیید نمی‌شود. بدین ترتیب می‌توان تمام گروه‌ها را با هم مقایسه کرد.



شکل ۲ نمودار زیرفضای پیشین و پسین در دو گونه زبانی فارسی و مازنی

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جهت بررسی پیش‌بینی کلیدی نظریه پراکندگی سازگاریافته مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی با ۶ واکه پیرامونی با مساحت فضای واکه‌ای گونه فریدونکناری گویش مازندرانی با ۵ واکه براساس شاخصه‌های مساحتی بکر-کریستال (۲۰۱۰) با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مساحت فضای واکه‌ای زبان فارسی بزرگتر از گویش مازندرانی است ولی رابطه بین گستره سازه اول با تعداد واکه تأیید نشد. جهت بررسی بیشتر، شاخصه‌های مساحتی در دو زیرفضای پیشین و پسین

به صورت جداگانه محاسبه شد و مشخص شد که گستره سازه اول در زیرفضای پسین زبان فارسی در سه گروه، بجز مردان در بافت هجاهای تکیه‌دار، گستره سازه اول بزرگتری نسبت به گویش مازندرانی دارد. بدین ترتیب رابطه گستره سازه اول با تعداد واکه در سه گروه از چهار گروه تأیید شد. نکته جالب توجه این است که گستره سازه اول در حاشیه پیشین برخلاف انتظار در گویش مازندرانی در همه گروه‌ها بزرگتر از زبان فارسی است.

منابع

- اسفندیاری، نسیم (۱۳۹۳). بررسی صوت‌شناختی فضای واکه‌ای در زبان فارسی و تحلیل آن در چارچوب نظریه پراکندگی سازگاریافته. پایان نامه دکتری زبان‌شناسی دانشگاه اصفهان.
- بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۹۲). *نظام آوایی زبان فارسی*. تهران: سمت.
- قرائتی، سپیده (۱۳۸۹). بررسی صوت‌شناختی تکیه واژگانی در زبان فارسی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان.
- علی‌نژاد، بتول و فهیمه حسینی‌بالام (۱۳۹۱). *مبانی آواشناسی آکوستیکی*. اصفهان: انتشارات دانشگاه اصفهان.
- علی‌نژاد، بتول (۱۳۹۱). فضای واکه‌ای در زبان فارسی. *پژوهشنامه زبان‌شناختی زبان فارسی*، شماره دوم، سال اول، ۴۵-۵۳.
- کرد زعفرانلو کامبوزیا، عالیه (۱۳۸۵). واج‌شناسی: رویکرد قاعده‌بنیاد. تهران: سمت.
- مدرسی قوامی، گلناز (۱۳۹۲). تأثیر تکیه واژگانی بر ویژگی‌های کیفی واکه‌های ساده زبان فارسی. *علم زبان*، سال ۱، شماره ۱، ۴۱-۵۶.
- محمدی، هیوا و همکاران (۱۳۹۲). تعیین ساختار سازه‌ای و فضای واکه‌ای در واکه‌های زبان فارسی. *دو ماهنامه شنوایی‌سنجی*، دوره ۲۰ شماره ۲، ۷۹-۸۵.

- Alexander, J. A. 2010. The theory of adaptive dispersion and acoustic-phonetic properties of cross-language lexical-tone systems, Ph.D dissertation in linguistics, University of Evanston, Illinois.
- Ansaian, A. k. 2004. An acoustic analysis of modern Persian vowels. Russia: 9th conference on Speech and computer, 20-22.
- Becker-Kristal, R. 2010. Acoustic typology of vowel inventories and Dispersion theory: insights from a large cross-linguistic corpus. Ph.D dissertation in linguistics, University of California, Los Angeles.
- Bradlow, A. 1995. Comparative study of English and Spanish vowels. *Journal of Acoustic Society of America*, 97: 1916-1924.

- Harrington, J. 2010. *Phonetic analysis of Speech Corpora*. London: Wiley-Blackwell publication.
- Lindblom, B. 1986. Phonetic universals in vowel systems. In J. Ohala, and J., Jaeger, (eds.) *Experimental phonology* (13-44) Orlando: Academic Press.
- Liljencrants, J. & B. Lindblom. 1972. Numerical simulation of vowel quality systems: the role of perceptual contrast. *Language* 48: 839-862.
- Livijn, P. 2000. Acoustic distribution of vowels in differently sized inventories – hot spots or adaptive dispersion? *PERILUS*, 23: 93-96.
- Mahalanobis, P. C. 1936. On the generalized distance in statistics. *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* 2(1): 49-55.
- Miller, J. D. 1989. Auditory –perceptual interpretation of the vowels. *Journal of Acoustic Society of America*, 88: 2114-2134.
- Padgett, J & M. Tabain. 2005. Adaptive dispersion theory and phonological vowel reduction in Russian. *Phonetica* 62: 14-54.
- Peterson, G. E. and H. L. Barney. 1952. Control methods used in a study of the vowels, *Journal of Acoustic Society of America*, 24: 175-184.
- Price, P. 2002. *The Use of Prosody in Syntactic Disambiguation*. Boston: Boston University.
- Rokne, J. 1996. The area of a simple polygon, J. Arvo, (1996) *Graphics Gems II*. San Diego, CA: Academic Press.
- Stevens, K.N. 1972. The quantal nature of speech: evidence from articulatory-acoustic data. In P. B. Denes and E. E. Davids (eds), *Human communication, A Unified View* (51-66), New York: McGraw-Hill.
- Stevens, K.N. 1998. *Acoustic Phonetics*. Cambridge, MA: MIT Press.