

ارسال: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

doi 10.22034/nf.2026.574010.1513

بررسی صوتی محل تولید، همخوان‌های انفجاری در زبان ترکی

وحید صادقی* (استاد زبان‌شناسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران)

سولماز محمودی (استادیار زبان‌شناسی دانشگاه آتاترک، ارزروم، ترکیه)

چکیده: فرکانس سازه دوم برحسب محل تولید همخوان مجاور تغییر می‌کند. این تغییر بر آغازه سازه دوم اثر می‌گذارد. بنابراین، سازه دوم واکه سرخ آکوستیکی محل تولید واکه‌ها است. از طرفی، با قرار گرفتن یک همخوان انفجاری بر سر راه واکه، مقدار آغازه F2 تحت تأثیر محل تولید انفجاری تغییر می‌کند. از این رو، گذار F2 از واکه به همخوان انفجاری و از همخوان انفجاری به واکه می‌تواند یک سرخ آکوستیکی مناسب برای محل تولید انفجاری‌ها باشد. به عبارتی، تغییر محل تولید باعث می‌شود تا شیب گذار F2 نیز تغییر کند. در یک مطالعه آزمایشگاهی، معادله خط رگرسیون و ضریب همبستگی تغییرات آغازه F2 را به صورت تابعی از F2 در مرکز واکه برای تعیین میزان هم‌تولیدی همخوان‌های انفجاری زبان ترکی آذری با هر یک از ۹ واکه این زبان به دست آوردیم. نتایج تحلیل داده‌ها وجود همبستگی مثبت و هم‌جهت بودن رابطه خطی بین آغازه سازه دوم و سازه دوم واکه را تأیید کرد. به طور کلی، نتایج به دست آمده نشان داد شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معادله خط رگرسیون سرخ‌های صوتی مناسبی برای بازشناسی و طبقه‌بندی محل تولید همخوان‌های انفجاری ترکی به لبی، تیغه‌ای و بدنه‌ای است.

کلیدواژه‌ها: معادله کانونی، همخوان‌های انفجاری، محل تولید همخوان، فرکانس سازه دوم، زبان ترکی.

۱. مقدمه

تولید همخوان‌های انفجاری باعث می‌شود تعداد قطعه‌ها یا بازه‌های صوتی از تعداد واج‌های درون یک پاره‌گفتار بیشتر شود. یک واج انفجاری حداکثر شامل پنج قطعه یا بازه صوتی است که پشت‌سرهم قرار می‌گیرد. این پنج بازه عبارت‌اند از بست، انفجار، سایش، دمش و گذار سازه‌ها. بست، یک بازه صوتی است که در حالت بی‌واک فاقد انرژی است و در حالت واکدار در ناحیه فرکانس‌های پایین می‌تواند دارای انرژی ضعیف تکانه‌های حنجره باشد که در صورت قرار گرفتن انفجاری واکدار بین دو واکه، انرژی تکانه‌های حنجره بیشتر می‌شود. انفجار، یک رهش کوتاه است که هنگام جدا شدن ناگهانی اندام گویایی فعال (لب پایین، نوک و تیغه زبان، بدنه زبان) از اندام گویایی منفعل متناظر با آن (لب بالا، دندان‌های بالا و لثه، لثه کام، سخت کام، نرم کام، ملاز) به وجود می‌آید. آواشناسان بسته به این‌که به بازه انفجار، بازه‌های سایش و دمش را اضافه کرده باشند یا خیر گزارش‌های متفاوت (از ۵ تا ۲۶ میلی‌ثانیه) در خصوص پنجره زمانی پردازش رقمی سیگنال داشته‌اند. سایش، یک بازه بسیار کوتاه سایشی است که پس از جدا شدن اندام گویایی فعال از اندام گویایی منفعل و خروج هوا از معبر تنگ به وجود می‌آید که مدت زمان آن بین صفر تا ۱۰ میلی‌ثانیه گزارش شده است. دمش، یک بازه صوتی بسیار شبیه به گذار سازه‌ها است (به سبب حرکت بدنه زبان به سمت تولید واکه) که در نتیجه خروج هوای ششی از حفره دهان در حالت بازخوانی یا تشدید حاصل می‌شود. مدت زمان دمش بین ۲ تا ۲۰ میلی‌ثانیه گزارش شده است. برخی آواشناسان دمش را به همراه سایش و انفجار یکجا اندازه‌گیری کرده و از عنوان انفجار برای این ناحیه صوتی استفاده می‌کنند؛ و بالاخره، گذار سازه‌ها، یک بازه صوتی است که لحظات پایانی حرکت بدنه زبان را برای تولید حالت ایستای واکه نشان می‌دهد، درحالی‌که، به طور هم‌زمان تارآوها شروع به ارتعاش می‌کنند.

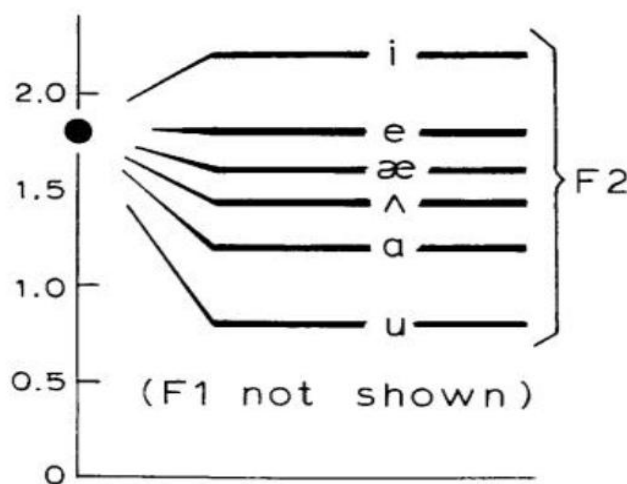
استیونز (1998) با مطالعه آوایی محل تولید همخوان‌های انفجاری، تعدادی پارامتر صوتی متناظر با تقابل محل تولید این همخوان‌ها را انتخاب کرد تا بتواند از آنها به عنوان مرجعی مناسب برای مقایسه طبقات مختلف همخوان‌های انفجاری در فرایند بازشناسی گفتار استفاده کند. از نظر وی، بخش ایستای همخوان‌های انفجاری شامل دو قطعه بست و رهش است و نشانه‌های صوتی متناظر با تقابل محل تولید همخوان‌های انفجاری می‌تواند به طور بالقوه در مجاورت محدوده بست یا رهش آنها تظاهر یابد. پیامد صوتی انسداد دستگاه گفتار در قطعه بست، کاهش قابل ملاحظه

شدت انرژی در حوزه فرکانس موج صوتی است که این کاهش انرژی مانع از آن می‌شود که الگوهای صوتی متناظر با محل تولید همخوان‌های انفجاری در ناحیه بست‌شان تظاهر آوایی داشته باشند. یعنی در محدوده بست همخوان‌های انفجاری، تقابل آواشناختی محل تولید خنثی می‌شود و با خنثی شدن این تقابل واجی، ناحیه بست نمی‌تواند مرجع مناسبی برای مقایسه محل تولید این همخوان‌ها باشد (Stevens 1998, pp. 323-325).

از نظر استیونز (1998) شکل کلی طیف فرکانسی قطعه رهش همخوان‌های انفجاری در دو حوزه زمان و فرکانس موج صوتی با توجه به متغیر مسیر محل تولید الگوی همخوانی متفاوت است. تفاوت در حوزه زمان، ناشی از الگوی آیرودینامیکی متفاوت حفره‌های بازخوانی دستگاه گفتار است. به عنوان مثال، جابجایی و تغییر وضعیت مرکز زبان یا عقب زبان در مقایسه با تیغه زبان یا لب‌ها به هنگام بست و رهش گرفتگی آهسته‌تر و تدریجی‌تر است که پیامد آن در فضای آیرودینامیکی، تأخیر در کاهش اختلاف فشار هوای فوق حنجره‌ای و زیرحنجره‌ای و در فضای صوتی، تأخیر در شروع الگوی ارتعاش تارآواها برای واکه و، در نتیجه، افزایش کشش نوفه رهش است. تفاوت در حوزه فرکانس موج صوتی ناشی از تابع انتقال منبع انرژی دستگاه گفتار از محل گرفتگی تا حفره دهان است. هر قدر فاصله میان محل گرفتگی تا حفره لب‌ها از یکدیگر دورتر باشد، میزان تابع انتقال کمتر و هر قدر به آن نزدیک‌تر باشد، میزان آن بیشتر است. محل وقوع تابع انتقال بر روی طیف فرکانسی گفتار، روند کلی توزیع نسبی انرژی را در فرکانس‌های مؤثر تغییر می‌دهد. واضح است که برای هر یک از همخوان‌های انفجاری، توزیع نسبی انرژی در نواحی مؤثر فرکانسی با توجه به مقادیر مختلف پارامتر تابع انتقال متغیر است که این باعث می‌شود شکل کلی طیف فرکانسی هر واج نسبت به واج دیگر تغییر کند (Stevens 1998, p. 330). بنابراین، تقابل محل تولید همخوان‌های انفجاری در حوزه فرکانس موج صوتی تظاهر آوایی دارد؛ یعنی روند کلی توزیع نسبی انرژی در نواحی مؤثر فرکانسی برای طبقات مختلف همخوان‌های انفجاری با توجه به متغیر مسیر محل تولید الگوی همخوانی و مقدار پارامتر تابع انتقال، قابل تغییر است.

دولاتر^۱ و همکاران (۱۹۵۵) با بررسی مسئله ثبات ادراکی در برابر عدم ثبات آکوستیکی و این‌که چگونه در جریان ادراک گفتار بین یک واج واحد و بازنمایی‌های آوایی متغیر آن انطباق برقرار می‌شود، سعی کردند نشان دهند، برخلاف تصور، سیگنال آکوستیکی فاقد ثبات نیست، بلکه هر واج در بازنمایی آوایی خود یک فضای آکوستیکی با تنوعات درونی را اشغال می‌کند که با فضای آکوستیکی دیگر واج‌ها در یک زبان واحد هم‌پوشی ندارد. او در مورد چگونگی درک محل تولید همخوان‌های انفجاری از ناحیه انفجار رهش که بسیار کوتاه‌مدت، گذرا و متغیر است توضیح می‌دهد که اطلاعات مربوط به محل تولید همخوان‌های انفجاری را باید در خود سیگنال جستجو کرد و گذار سازه‌ای یعنی تغییر فرکانس سازه‌های واکه در مجاورت همخوان، اطلاعات ارزشمندی را در مورد محل تولید انفجاری‌ها در بر دارد.

دولاتر و همکاران (همان) فرضیه نقطه ثابت انتزاعی به نام کانون^۲ را مطرح کردند که گذار سازه دوم F2 واکه‌های متفاوت در مجاورت یک همخوان واحد از آن نشأت می‌گیرند و این کانون نشانگر ثابت محل تولید همخوان‌های انفجاری است (شکل ۱).



شکل ۱ کانون از دیدگاه دولاتر و همکاران (۱۹۹۵)

1) P.C. Delattre

2) Locus

آواشناسان طی تحقیقاتی نشان دادند الگوی ثابتی برای گذار سازه‌ای واکه‌ها در مجاورت یک همخوان واحد وجود ندارد و کانون یک نقطه ثابت نیست که این یافته صوتی به طرح معادله مکانی^۱ منجر شد. بنابراین، کانون در معادله‌های کانونی انتزاعی و ثابت مطلق نیستند، بلکه بر داده‌های عینی استوار بوده و از ثبات نسبی برخوردار است.

معادله مکانی یک انگاره آماری برای هم‌تولیدی^۲ انفجاری و واکه است. اگر ثابت شود معادله مکانی حاوی یک یا چند سرنخ آکوستیکی برای طبقه‌بندی محل تولید انفجاری‌ها است، آنگاه هم‌تولیدی به‌عنوان یک الگوی آواشناختی، معیار طبقه‌بندی یا تقابل واجی خواهد بود (بی‌جن‌خان ۱۳۹۲، ص ۲۵۰).

در معادله خطی رگرسیون^۳ $(y=ax+b)$ ارائه‌شده از سوی ساسمن^۴ و شور^۵ (۱۹۹۶) مقدار y مقدار F_2 و x مقدار F_2 در بخش ایستای واکه است. هر معادله مکانی دو پارامتر a یعنی شیب خط^۶ رگرسیون و b یعنی عرض از مبدأ^۷ دارد. شیب خط رگرسیون مشتق تابع آغازانه سازه دوم نسبت به سازه دوم واکه است و نشان می‌دهد به‌ازای هر تغییر در سازه دوم واکه چه میزان تغییر در آغازانه سازه دوم اتفاق می‌افتد. عرض از مبدأ در معادله مکانی، نقطه‌ای است که در آن نقطه خط رگرسیون را قطع می‌کند، مقدار آغازانه سازه دوم به ازای صفر شدن مقدار سازه دوم واکه است. از طرف دیگر، R^2 ضریب همبستگی^۸ (ضریب پیرسون) است که مقدار آن بین $+1$ و -1 است. ضریب همبستگی، میزان همبستگی تغییرات آغازانه سازه دوم به سازه دوم واکه را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بیش از 0.5 به معنای وجود همبستگی و کمتر از 0.5 به معنای عدم وجود همبستگی است. همبستگی به دو صورت مثبت و منفی است. در همبستگی مثبت با افزایش مقادیر F_2 واکه مقادیر F_2 آغازانه واکه نیز زیاد می‌شود، یا با کاهش مقادیر F_2 واکه مقادیر F_2 آغازانه واکه نیز کاهش می‌یابد. در حالی که، در همبستگی منفی بین دو متغیر رابطه عکس وجود دارد، یعنی با افزایش مقادیر F_2 واکه، مقادیر F_2 آغازانه واکه کاهش می‌یابد؛ یا با کاهش مقادیر F_2 واکه، مقادیر F_2 آغازانه واکه

1) locus equation

3) regression line

5) J. Shore

7) y intercept

2) coarticulation

4) H. M. Sussman

6) slope

8) correlation

افزایش می‌یابد. بنابراین، قدر مطلق ضریب همبستگی (صرف نظر از مثبت و منفی بودن آن) نشانگر شدت رابطه‌ی آغازۀ سازه‌ی دوم به سازه‌ی دوم واکه است. اما، اگر مقدار ضریب همبستگی صفر باشد، هیچ رابطه‌ی خطی بین آغازۀ سازه‌ی دوم به سازه‌ی دوم واکه وجود ندارد.

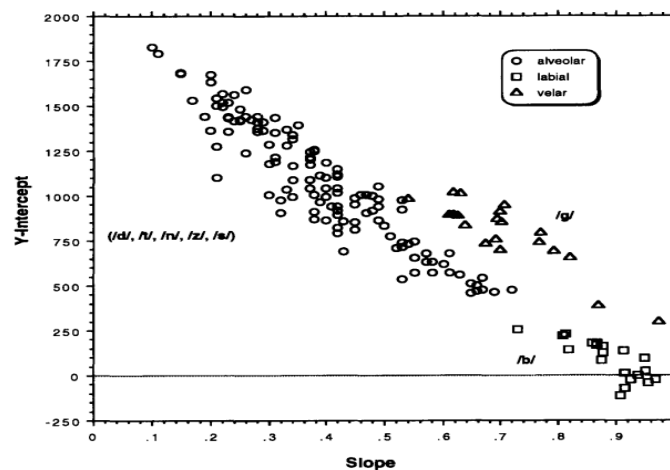
۲. پیشینه پژوهش

لیندبلوم^۱ (1963, p. 775) در مطالعه‌ی کاهش هشت واکه‌ی سوئدی در توالی‌های واکه-همخوان انفجاری واکدار در بافت CVC به تغییر مقادیر F2 واکه به صورت تابعی از مقادیر F2 در انتهای رهش انفجاری توجه نشان داد و آن را به عنوان یک سرنخ صوتی مهم برای کاهش واکه‌ای تعریف کرد. وی، سپس، تغییر مقادیر F2 واکه را بر حسب تغییر مقادیر F2 در مرز انفجار و واکه برای نخستین بار در قالب یک معادله‌ی خطی محاسبه کرد.

ساسمن^۲ و همکاران (1998) معادله‌ی خط رگرسیون ($y=ax+b$) تغییرات مقادیر آغازۀ F2 بر حسب مقادیر F2 در بخش ایستای واکه را برای انفجاری‌های زبان انگلیسی در بافت CV به دست آورده و آن را مبنای تمایز محل تولید انفجاری‌ها از یکدیگر قرار دادند. آنها نشان دادند که بین آغازۀ سازه‌ی F2 و سازه‌ی F2 ناحیه‌ی ایستای واکه همبستگی بالایی وجود دارد و شیب خط رگرسیون در تحلیل‌های همبستگی از یک محل تولید به محل تولید دیگر متفاوت است، به طوری که شیب خط رگرسیون [b] از [d] و [g] متفاوت است و برای [g] دو خط رگرسیون متفاوت وجود دارد: یکی متعلق به [g] نرم‌کامی در بافت واکه‌های پسین و دیگری متعلق به [ɟ] سخت‌کامی در بافت واکه‌های پیشین. آنها، همچنین، اعداد به دست آمده از ۲۰ گویشور انگلیسی-آمریکایی را در نموداری به ترتیب روی محور افقی x (F2 واکه) و عمودی y (F2 آغازۀ واکه) رسم کردند (شکل ۲). ضرایب شیب و عرض از مبدأ برای همخوان [b] به ترتیب ۰/۸۹ و ۹۹ هرتز، [d] به ترتیب ۰/۴۲ و ۱۲۱۱ هرتز و [g] به ترتیب ۰/۷۱ و ۷۹۲ هرتز در بافت‌های واکه‌ای متفاوت به دست آمد که حوزه‌های مجزایی را تشکیل می‌دادند.

1) B. Lindblom

2) H. M. Sussman



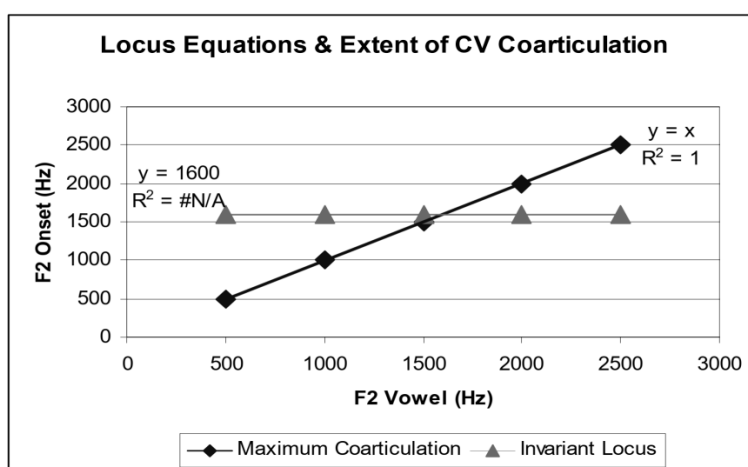
شکل ۳ نمودار پراکندگی مختصات شیب و عرض از مبدأ برای همخوان‌های تیغه‌ای /t/, /s/, /n/, /d/ و /z/ در گفتار ۲۲ گویشور زبان انگلیسی (ساسمن و شور ۱۹۹۶)

کرول^۱ (۱۹۸۸) در بررسی معادله مکانی محل تولید انفجاری‌ها دو وضعیت کاملاً آرمانی^۲ را که معمولاً اتفاق نمی‌افتد در نظر می‌گیرد. در یکی رابطه ۱۰۰ درصد خطی و همبستگی کامل بین دو متغیر آغاز سازه دوم و سازه دوم واکه در معادله خط رگرسیون را نشان داده است که در آن مقادیر متغیرهای آغاز سازه دوم و سازه دوم واکه یکسان هستند (یعنی مثلاً وقتی مقدار x برابر با ۱۰۰۰ است، مقدار y هم برابر با ۱۰۰۰ است) و ضریب همبستگی برابر با ۱ است. در واقع، شدت رابطه بین دو متغیر به حداکثر خود رسیده است. در این حالت، هم‌تولیدی انفجاری و واکه، بیشینه و همبستگی، کامل است. دیگری هنگامی است که مقادیر آغاز سازه دوم به ازای مقادیر مختلف سازه دوم واکه در معادله مکانی ثابت باشد، یعنی هیچ‌گونه تغییری به تبع تغییر سازه دوم واکه در آن حاصل نشود (یعنی اگر مقدار x به اندازه ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ تغییر کند مقدار y ثابت است و هیچ تغییری نمی‌کند و در همه موارد ۱۵۰۰ است). در این حالت، ضریب همبستگی صفر یا نزدیک به صفر است و این به معنای عدم همبستگی و عدم هم‌تولیدی همخوان و واکه است. شکل ۴ خط رگرسیون شیب‌دار حداکثر

۱) D. Krull

۲) idealized

هم‌تولیدی همخوان با واکه را در CV نشان می‌دهد و خط رگرسیون ثابت و بدون شیب نشان‌دهنده عدم هم‌تولیدی همخوان و واکه در CV است. به عبارتی، هرچه شیب معادله مکانی به سطح هموار نزدیک‌تر باشد به معنای کاهش هم‌تولیدی است و هرچه شیب معادله کانونی بیشتر باشد به معنی افزایش هم‌تولیدی است.



شکل ۴ شیب معادله کانونی به عنوان شاخصی از میزان هم‌تولیدی CV (کرول ۱۹۸۸).

ویژگی‌های صوتی محل تولید همخوان‌های انفجاری فارسی در برخی پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مدرسی قوامی و دیگران (2005, pp. 101-113) برای مقایسه معادله کانونی همخوان‌های انفجاری واکدار از بی‌واک، از سه بار تکرار توالی‌های CV ساختگی شش همخوان انفجاری و شش واکه ساده زبان فارسی که توسط دو گویشور مرد فارسی‌زبان تولید شدند بهره گرفته و نشان دادند که شیب معادله کانونی و عرض از مبدأ برای همخوان‌های انفجاری واکدار [b] به ترتیب ۸۷/۰ و ۸۴/۱۵ هرتز، [d] به ترتیب ۵۰/۰ و ۹۶۹ هرتز، برای [j, g] به ترتیب ۱۰/۱ و ۹۴/۳۸ هرتز است. شیب محل تولید دندانی/لثوی از همه کمتر و شیب محل تولید کامی/نرم‌کامی از همه بیشتر است. زیرا انفجاری‌های کامی فارسی با محل تولید واکه‌های پس از خود همگونی کامل دارند. جایگاه تولید دولبی در وضعیتی بینابین قرار دارد. این نتایج، همچنین، نشان داد شیب خط رگرسیون معادله کانونی و عرض از مبدأ برای همخوان‌های انفجاری بی‌واک فارسی [p^h]

به‌ترتیب ۰/۶۹ و ۴۱۸ هرتز، برای $[t^h]$ به‌ترتیب ۰/۲۹ و ۱۳۵۹ هرتز، $[k^h]$ به‌ترتیب ۰/۹۵ و ۲۴۶/۲۷ هرتز است. باز هم شیب جایگاه تولید دندان‌ی/لثوی از همه کمتر و شیب جایگاه تولید کامی/نرم‌کامی از همه بیشتر است. جایگاه تولید دولبی در وضعیتی بینابین قرار دارد. بر این اساس، مدرسی قوامی و همکاران به این نتیجه رسیدند که مقایسه معادله‌های کانونی نشان می‌دهد که شیب خط رگرسیون بسته به متغیر واک متفاوت است، اما اگر ضریب‌های شیب و عرض از مبدأ معادله‌های کانونی همه همخوان‌های انفجاری را در یک نمودار واحد در کنار هم نشان دهیم، مشخص می‌شود که هر محل تولیدی صرف‌نظر از وضعیت حنجره (واکداری و بی‌واکی) فضای خاص خود را اشغال می‌کند و گرچه ممکن است داده‌های خام به‌دست‌آمده از گویشوران متفاوت برای یک واج واحد ثباتی نشان ندهد و از نظر آکوستیکی تنوع داشته باشد، اما با در نظر گرفتن ضرایب معادله‌های کانونی این داده‌ها، بازنمایی‌های آوایی یک واج واحد، فضای آکوستیکی خاص خود را اشغال می‌کند که با فضای آکوستیکی بازنمایی‌های آوایی واج‌های دیگر در یک زبان واحد همپوشی ندارد.

بی‌جن‌خان (۱۳۹۲، ص ۲۴۳-۲۵۴) پراکندگی نقاط، معادله خط رگرسیون و ضریب همبستگی تغییرات آغاز F2 را به ازای مقادیر مختلف F2 برای شش واکه فارسی در رشته‌های آوایی vdv ، vbv ، vqv ، $vvgv$ به‌دست داده است. در پژوهش وی، شیب معادله مکانی انفجاری‌ها با تقریب ۰/۰۱ به‌ترتیب صعودی برای $[b]$ برابر با ۰/۱۰ و عرض از مبدأ ۱۲۸۰/۶ گزارش شده است، به‌همین ترتیب، برای $[d]$ شیب برابر با ۰/۲۲ و عرض از مبدأ برابر با ۱۵۱۴/۶، برای $[G]$ شیب برابر با ۰/۷۷ و عرض از مبدأ برابر با ۱۵۶/۴۷ و بالاخره این که برای $[g]$ ، $[j]$ شیب برابر با ۱/۲۴ و عرض از مبدأ برابر با ۱۷۱/۶۶ به‌دست آمد. نکته مهم این که، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با یافته‌های مدرسی قوامی هماهنگ نبود. بی‌جن‌خان علت ناهماهنگی این دو یافته را ناشی از کم بودن تعداد زوج‌های مرتب سازه دوم آغاز و سازه دوم واکه در استخراج معادله مکانی دانسته و توضیح می‌دهد که ردیابی آغاز F2 در طیف‌نگاشت و طیف فرکانسی در گذار از انفجاری واکدار به واکه دقیق نیست و ممکن است استخراج آن همراه با خطا باشد، زیرا معیار تشخیص آغاز سازه دوم، یافتن اولین دوره تناوب بعد از انفجار است و چون وی.ا.تی در تولید انفجاری واکدار، منفی، صفر یا اندکی بیش از صفر است در بسیاری از موارد تعیین مرز بین پایان انفجار و اولین تکانه

حنجره از روی طیف‌نگاشت بسیار سخت و غیرممکن است، درحالی‌که برای گذار از انفجاری بی‌واک به واکه، دمش بعد از انفجار به ردیابی راحت‌تر آغازه F2 واکه کمک می‌کند.

بی‌جن‌خان (۱۳۹۲، ص ۲۵۷-۲۶۲) همچنین در پژوهشی دیگر میانگین طیف فرکانسی قطعه انفجار هریک از همخوان‌های انفجاری فارسی را در بافت آوایی V-V محاسبه کرد و نشان داد میانگین طیف فرکانسی انفجاری‌های لبی سیر نزولی و انفجاری دندان‌سیر صعودی دارد، اما ویژگی مشترک آنها عدم وجود یک ناحیه یا سازه فرکانسی غالب در پهنای صفر تا ۸ کیلوهرتز است. از نظر صوتی، انفجاری‌های لبی و دندان‌سیر دارای مشخصه پراکنده^۱ هستند، یعنی پراکندگی بی‌نظم انرژی روی فرکانس‌ها مشاهده می‌شود و انرژی در هیچ بخشی از طیف فرکانسی متمرکز نیست. اما، در میانگین طیف فرکانسی انفجاری سخت‌کامی و نرم‌کامی یک ویژگی مشترک بارز وجود دارد و آن وجود یک ناحیه فرکانسی با انرژی بیشینه در وسط طیف فرکانسی است. از نظر صوتی، انفجاری‌های سخت‌کامی و نرم‌کامی دارای مشخصه فشرده^۲ هستند، زیرا در یک ناحیه از طیف فرکانسی آنها تمرکز انرژی بیشینه وجود دارد.

صادقی (۱۳۸۵، ص ۲۱۱-۲۱۷) طیف فرکانسی بخش ایستای همخوان‌های انفجاری فارسی را با مشاهده فرکانس‌های سازه‌ای مؤثر در قطعه رهش آنها بر روی طیف‌نگاشت توصیف و الگوی صوتی متعلق به هر طبقه از همخوان‌های انفجاری را براساس روند کلی افزایش و کاهش میزان شدت انرژی در نواحی فرکانسی مؤثر به دست آورد. سپس، نشان داد آنچه باعث تقابل محل تولید همخوان‌های انفجاری فارسی می‌شود، تفاوت در حداکثر میزان شدت انرژی طیف در نواحی فرکانسی بالای ۳۰۰۰ هرتز است. به‌طوری‌که، برای قطعه رهش [p] متوسط شدت انرژی فرکانس‌های پایین در مقایسه با فرکانس‌های بالاتر بیشتر است، یعنی هر قدر از نواحی فرکانسی میانی به سمت فرکانس‌های بالاتر می‌رویم از میزان شدت انرژی طیف کاسته می‌شود، درحالی‌که، برای [t] متوسط شدت انرژی فرکانس‌های بالا در مقایسه با فرکانس‌های پایین‌تر، بیشتر است. همچنین، برای انفجاری بدنه‌ای [c] تمرکز نسبی انرژی روی فرکانس‌های میانی، یعنی بین ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ هرتز است و برای [G] توزیع انرژی روی فرکانس‌های پایین‌تر، یعنی ۱۲۰۰ تا ۲۵۰۰ هرتز است.

1) [+diffuse]

2) [+compact]

این پژوهش به بررسی صوتی محل تولید همخوان‌های انفجاری زبان ترکی آذری می‌پردازد و به دنبال پاسخ به این پرسش است که آیا شیب خط رگرسیون و عرض از مبدأ در معادله خطی حاصل از تغییرات مقادیر آغازه F2 برحسب مقادیر F2 در بخش ایستای واکه می‌تواند یک سرنخ آکوستیکی برای تمایز محل تولید انفجاری‌ها و نیز سرنخی برای میزان هم‌تولیدی همخوان انفجاری با واکه در زبان ترکی آذری باشد.

هدف پژوهش، محاسبه معادله‌های مکانی انفجاری‌های لبی، دندانی-لثوی و کامی ترکی آذری در زنجیره‌های آوایی V.CV به‌منظور تشخیص محل تولید همخوان‌های انفجاری است. تا آنجا که نگارندگان اطلاع دارند، پیش از این، پژوهشی با موضوع معادله مکانی همخوان‌های انفجاری در زبان ترکی آذری انجام نشده است، ولی روی گونه‌های دیگر زبان ترکی و به‌طور مشخص ترکی استانبولی پژوهش‌هایی انجام شده است.

آکدمیر و دیگران^۱ (2012) معادله‌های مکانی مربوط به توالی شش همخوان انفجاری و هشت واکه زبان ترکی استانبولی را از گفتار ۱۲ زن و ۱۳ مرد ترک‌زبان ساکن ترکیه به‌دست آورده و ضرایب شیب و عرض از مبدأ مربوط به همخوان‌های انفجاری واکدار و بی‌واک را بر روی نموداری ترسیم کردند. اعداد مربوط به همخوان‌های انفجاری در بافت‌های واکه‌ای متفاوت حوزه‌های مجزایی را تشکیل دادند. مقدار شیب خط رگرسیون و عرض از مبدأ [b] به‌ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۶۰، [d] به‌ترتیب ۰/۷۰ و ۰/۵۰، [g] به‌ترتیب ۱/۰۷ و -۶۱/۱، [p] به‌ترتیب ۱/۰۱ و -۳۳/۹، [t] به‌ترتیب ۰/۹۰ و ۱۸/۳ و [k] به‌ترتیب ۰/۹۸ و ۷۴/۲ به‌دست آمد. آنها به این نتیجه رسیدند که گرچه در [p] و [g] ضریب همبستگی منفی است و بین مقادیر دو متغیر F2 واکه و مقادیر F2 آغازه واکه رابطه عکس وجود دارد، اما، به‌طور کلی، بین آغازه سازه F2 و سازه F2 واکه همبستگی بالایی وجود دارد و معادله‌های مکانی، ثبات نسبی سیگنال صوتی را در حوزه همخوان‌های انفجاری نشان می‌دهند. از این رو، پارامترهای معادله‌های مکانی می‌تواند مشخصه‌میزی برای تشخیص محل تولید همخوان‌های انفجاری ترکی استانبولی باشد.

1) E. Akdemir, I. Ozbek, T. Çiloglu

۳. روش پژوهش

برای انجام این پژوهش، پیکره‌ای هدفمند شامل کلمات دوهجایی زبان ترکی آذری ساخته شد که در آنها هر همخوان انفجاری دست‌کم یک بار در مجاورت یکی از واکه‌های متمایز این زبان در هجای دوم در بافت V.CV قرار داشت. ۱۵ گویشور زن و مرد ترک‌زبان کلمات هدف را تولید کردند. مقادیر فرکانس سازه دوم در مرکز واکه^۱ (ناحیه ایستا) و مقادیر فرکانس سازه دوم در آغاز واکه^۲ (ناحیه گذار) به ازای تمامی واکه‌های بعد از همخوان‌های انفجاری اندازه‌گیری شد. سازه دوم هر توالی در آغاز و میانه واکه اندازه‌گیری شد و معادله کانونی مربوط به هر همخوان رسم گردید. ضبط داده‌ها در شرایط آزمایشگاهی از طریق میکروفون شور^۳ مدل SM58 با پاسخ فرکانسی ۵۰ تا ۱۵۰۰۰ هرتز بر روی کارت صوتی کریتیو^۴ مدل ساند بلاستر X-Fi 5.13 انجام شد. علائم آوایی به‌صورت مونو^۵ با نرخ نمونه‌برداری ۲۲۰۵۰ هرتز با استفاده از نرم‌افزار ویو ادیتور^۶ در سیستم عامل ویندوز ۱۰ ضبط شدند. جهت اندازه‌گیری آغاز F2 در سیگنال و طیف‌نگاشت، در گذار از انفجاری به واکه، ابتدای واکه یعنی اولین تناوب ارتعاش تارآواها (اولین تکانه حنجره) را بعد از لحظه رهش انفجاری (در انفجاری‌های واکدار) و پایان دمش (در انفجاری‌های بی‌واک) در نرم‌افزار پرت (PRAAT) ویرایش ۶.۳.۰۳ بورزما و وینینک^۷ (2022) به‌دست آوردیم. F2 واکه نیز از میانگین سازه‌های فرکانس دوم در وضعیت ثابت انرژی به‌دست آمد. گویشوران ترک‌زبان هر یک ۶۳ نمونه آوایی حاوی همخوان انفجاری را در کلمات دوهجایی و در بافت آوایی CV تولید کردند. بنابراین، معادله‌های مکانی از بررسی‌های آکوستیکی ۹۴۵ نمونه آوایی زبان ترکی آذری استخراج شده است. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل و مسیر insert>scatter و پراکندگی زوج‌های آغاز F2 به‌عنوان متغیر وابسته و F2 مرکز واکه به‌عنوان متغیر مستقل با استفاده از معادله خط رگرسیون بر روی نمودار پراکندگی^۸ رسم گردید.

1) mid vowel frequency

3) Shure

5) mono

7) Boersma and Weenink

2) onset vowel frequency

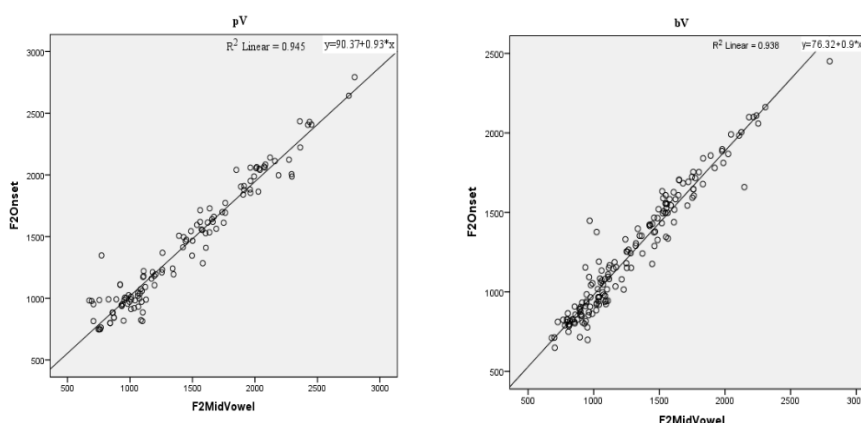
4) creative

6) wave editor

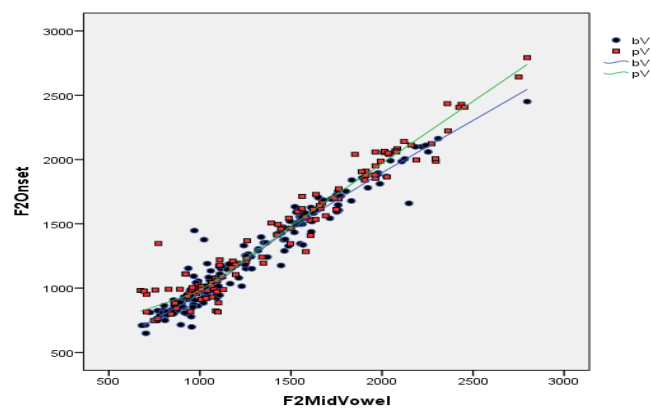
8) scatterplot

۴. تحلیل داده‌ها

به‌منظور استخراج معادله خط رگرسیون، مقادیر آغازۀ سازه دوم و سازه دوم واکه به ازای ۹ واکه ترکی در بافت CV بعد از همخوان‌های انفجاری به‌دست آمد. شکل ۵ معادله کانونی به‌دست آمده برای توالی‌های bv (سمت راست) و pv (سمت چپ) را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، برای توالی bv، ضریب همبستگی برابر با $R^2 = 0.93$ است، درنتیجه، هم‌تولیدی همخوان و واکه پیشینه است و شدت رابطه بین دو متغیر به حداکثر خود رسیده است. مقدار شیب معادله کانونی با تقریب ۰/۰۱ برای b صعودی و برابر با ۰/۹ و مقدار عرض از مبدأ ۷۶/۳۲ است. در شکل سمت چپ، برای توالی pv، شیب معادله مکانی کمی تندتر است، درنتیجه، میزان هم‌تولیدی همخوان-واکه نسبت به توالی bv کمی بیشتر است. ضریب همبستگی برابر با $R^2 = 0.93$ است، مقدار عرض از مبدأ ۹۰/۳۷ و مقدار شیب معادله کانونی با تقریب ۰/۰۱ برای p صعودی و برابر با ۰/۹۳ است. در شکل ۶ معادله کانونی مربوط به دو توالی یادشده برای مقایسه در کنار یکدیگر آمده‌اند.

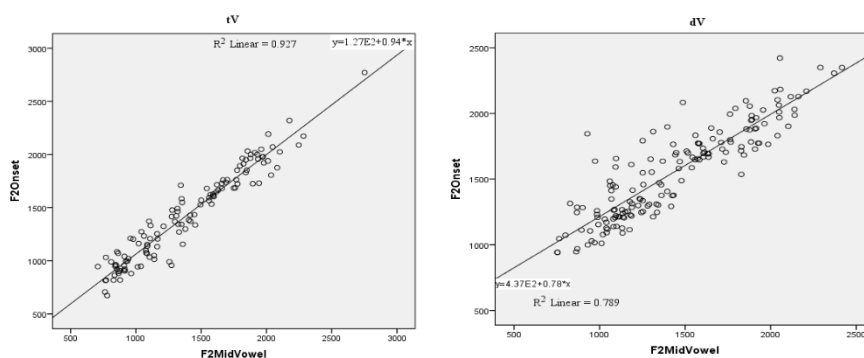


شکل ۵ معادله کانونی bv (سمت راست) و pv (سمت چپ)

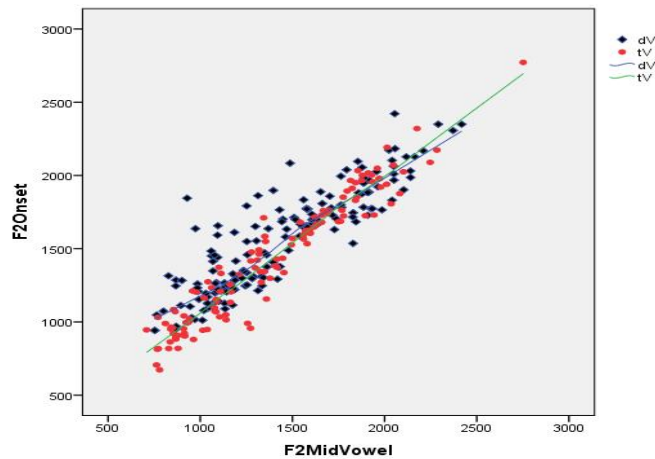


شکل ۶ دو معادله کانونی bV و pV

شکل ۷ شیب معادله مکانی توالی‌های dV (راست) و tV (چپ) را نشان می‌دهد. برای dV ضریب همبستگی برابر با $R^2 = 0.78$ ، مقدار عرض از مبدأ 4.37×10^3 و مقدار شیب معادله کانونی با تقریب 0.01 برای d صعودی و برابر با 0.78 است. در سمت چپ، توالی tV ضریب همبستگی برابر با $R^2 = 0.927$ دارد، مقدار عرض از مبدأ 1.27×10^4 و مقدار شیب معادله کانونی با تقریب 0.01 برای t صعودی و برابر با 0.94 است. در شکل ۸ معادله کانونی مربوط به دو توالی یادشده برای مقایسه در کنار یکدیگر آمده‌اند.

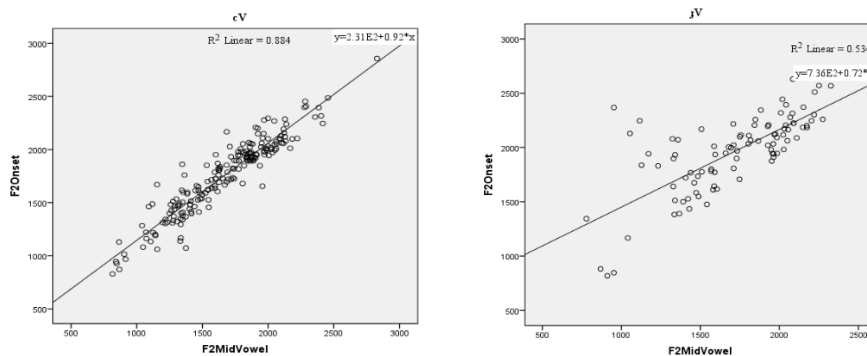


شکل ۷ معادله کانونی dV (سمت راست) و tV (سمت چپ)



شکل ۸ دو معادله کانونی dV و tV

شکل ۹ معادله کانونی به دست آمده برای توالی‌های gV (سمت راست) و kV (سمت چپ) را نشان می‌دهد. در این شکل، توالی gV ضریب همبستگی برابر با $R^2 = 0.53$ دارد؛ مقدار عرض از مبدأ $7/36$ و مقدار شیب معادله کانونی آن با تقریب $0/01$ صعودی و برابر با $0/72$ است. در مقابل، ضریب همبستگی به دست آمده برای kV برابر با $R^2 = 0.88$ است، مقدار عرض از مبدأ $2/31$ و مقدار شیب معادله کانونی آن با تقریب $0/01$ صعودی و برابر با $0/92$ است.



شکل ۹ معادله کانونی gV (سمت راست) و kV (سمت چپ)

چندین آزمون تحلیل واریانس دوعامله برای تعیین سطح معنی‌داری اثر دو عوامل محل تولید و واکداری-بی‌واکی بر مقادیر شیب (a)، عرض از مبدأ (b) و ضریب همبستگی (R^2) معادله‌های مکانی انجام شد. نتایج (جدول ۱) نشان داد اثر محل تولید بر مقادیر هر سه پارامتر شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معنادار است. نتایج آزمون‌های تعقیبی بُنفرونی نشان داد مقدار شیب خط رگرسیون انفجاری‌های لبی به‌طور معناداری از انفجاری‌های تیغه‌ای و بدنه‌ای بیشتر است، ($p < 0.001$) ولی، شیب معادله انفجاری‌های تیغه‌ای تفاوت معناداری با انفجاری‌های بدنه‌ای ندارد ($p = 0.54$). مقایسه‌های دوبه‌دوی بُنفرونی برای پارامتر عرض از مبدأ در تمامی موارد اختلاف معنادری را نشان داد ($p < 0.001$) و بالاخره این که، درحالی‌که اختلاف ضریب همبستگی معادله مکانی برای انفجاری‌های لبی و تیغه‌ای با انفجاری‌های بدنه‌ای معنادار بود ($p < 0.001$)، بین انفجاری‌های لبی و تیغه‌ای اختلاف معناداری برای این پارامتر به‌دست نیامد ($p = 0.39$).

نتایج به‌دست‌آمده همچنین نشان داد اثر عامل واکداری-بی‌واکی و اثر تعاملی دو عامل محل تولید و واکداری-بی‌واکی بر مقادیر هر سه پارامتر شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معنادار است. در مقایسه‌های دوبه‌دوی آزمون‌های تعقیبی بُنفرونی مشاهده شد که اختلاف مقادیر پارامتر عرض از مبدأ برای تمامی جفت انفجاری‌های واکدار-بی‌واک صرف‌نظر از محل تولید همخوان انفجاری با یکدیگر معنادار است، ولی درحالی‌که مقادیر این پارامتر برای انفجاری‌های تیغه‌ای و بدنه‌ای واکدار از جفت بی‌واک‌شان بیشتر است، برای انفجاری‌های لبی عکس این وضعیت صادق است، یعنی انفجاری لبی واکدار /b/ عرض از مبدأ پایین‌تری از جفت بی‌واک آن یعنی /p/ دارد. مقایسه‌ها برای دو پارامتر شیب و ضریب همبستگی نشان داد که انفجاری‌های بی‌واک مقادیر شیب و ضریب همبستگی بیشتری نسبت به جفت واکدارشان دارند که اختلاف مقادیر این پارامترها برای انفجاری‌های (واکدار-بی‌واک) تیغه‌ای و بدنه‌ای با یکدیگر معنادار است، ولی برای انفجاری‌های لبی معنادار نیست.

جدول ۱ خلاصه نتایج آزمون‌های تحلیل واریانس برای محاسبه سطح معنی‌داری اثر دو عامل محل تولید و واک (واکداری-بی‌واکی) بر مقادیر شیب (a)، عرض از مبدأ (b) و ضریب همبستگی (R^2) معادله مکانی

متغیر	شیب (a)	عرض از مبدأ (b)	ضریب همبستگی (R^2)
محل تولید	$F(2,61)=0.9; p=0.03$	$F(2,61)=531.52; p<0.001$	$F(2,61)=59.28; p<0.001$
واک	$F(2,61)=73.03, p<0.001$	$F(2,61)=93.28, p<0.001$	$F(2,61)=19.02, p<0.001$
محل تولید*واک	$F(2,61)=16.04, p<0.001$	$F(2,61)=0.26; p=0.61$	$F(2,61)=12.99, p<0.001$

با توجه به نتایج فوق می‌توان این‌گونه بحث کرد که شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معادله مکانی حاصل از سازه دوم واکه به‌عنوان متغیر مستقل و آغازه سازه دوم به‌عنوان متغیر وابسته در زنجیره‌های آوایی CV سرخ‌های صوتی مناسبی برای طبقه‌بندی محل تولید همخوان‌های انفجاری ترکی به لبی، تیغه‌ای و بدنه‌ای است. اما، ذکر چند نکته در رابطه با این یافته ضروری به نظر می‌رسد.

اول این که، ضرایب شیب و عرض از مبدأ همخوان‌های واکدار [b, d, g] در بافت‌های واکه‌ای متفاوت حوزه‌های کاملاً مجزایی را تشکیل می‌دهند، به‌نحوی که میانگین شیب و عرض از مبدأ انفجاری واکدار لبی /b/ بیشتر از انفجاری واکدار تیغه‌ای /d/ و برای انفجاری تیغه‌ای /d/ بیشتر از انفجاری بدنه‌ای /g/ است. عرض از مبدأ انفجاری واکدار لبی /b/ هم از دو طبقه تیغه‌ای و بدنه‌ای بیشتر است، ولی مقدار عرض از مبدأ انفجاری تیغه‌ای /d/ برخلاف میانگین شیب بیشتر از انفجاری بدنه‌ای /g/ کمتر است. بر این اساس، هر سه پارامتر شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معادله مکانی در طبقه‌بندی محل تولید انفجاری‌های واکدار ترکی مؤثرند؛ یعنی معادله مکانی خط رگرسیون حاصل از تغییرات آغازه F2 برحسب F2 (مرکز) واکه در بافت CV حاوی سه سرخ صوتی معتبر برای طبقه‌بندی محل تولید انفجاری‌های واکدار [b, d, g] در زبان ترکی است. در مقابل، معادله مکانی انفجاری‌های بی‌واک [p, t, k] تنها حاوی یک سرخ صوتی برای طبقه‌بندی محل تولید آنها است و آن عرض از مبدأ است. دو پارامتر دیگر، یعنی شیب و ضریب همبستگی سرخ‌های مناسبی برای تمایز محل تولید انفجاری‌های بی‌واک ترکی نیستند، زیرا توزیع مقادیر این پارامترها منجر به شکل‌گیری حوزه‌های صوتی مجزا برای طبقه‌بندی محل تولید این همخوان‌ها نشده است. به این ترتیب، معادله مکانی برای انفجاری‌های واکدار [b, d, g] یک

مدل آماری جامع و برای انفجاری‌های بی‌واک [p, t, k] یک مدل آماری یک‌بعدی برای هم‌تولیدی انفجاری-واکه و طبقه‌بندی محل تولید انفجاری‌ها است. به بیان دیگر، معادله مکانی، تخمین آماری معتبرتری از محل تولید انفجاری‌های واکدار در مقایسه با انفجاری‌های بی‌واک به‌دست می‌دهد.

نکته دیگر آن‌که، مقدار و ضریب شیب معادله مکانی انفجاری‌های بی‌واک از انفجاری‌های واکدار بیشتر است. بنابراین، میزان هم‌تولیدی انفجاری-واکه برحسب شدت وابستگی آغازۀ سازه دوم به سازه دوم واکه در انفجاری‌های بی‌واک از انفجاری‌های واکدار بیشتر است. بالاخره این‌که، شیب معادله مکانی انفجاری‌های بدنه‌ای [k, g] در مقایسه با انفجاری‌های لبی و تیغه‌ای کمتر است؛ این در حالی است که انتظار می‌رود انفجاری‌های بدنه‌ای همگونی بیشتری با واکه بعد از خود داشته باشند. در بخش بعد در این باره بیشتر بحث خواهیم کرد.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی میزان هم‌تولیدی همخوان‌های انفجاری لبی، تیغه‌ای، بدنه‌ای با هریک از ۹ واکه زبان ترکی در زنجیره‌های آوایی CV پرداخته‌ایم تا از این طریق سرنخ(های) آکوستیکی مربوط به طبقه‌بندی محل تولید هریک از همخوان‌های انفجاری را به‌دست آوریم. برای این منظور، معادله مکانی حاصل از سازه دوم واکه به‌عنوان متغیر مستقل و آغازۀ سازه دوم به‌عنوان متغیر وابسته محاسبه گردید. نتایج تحلیل داده‌ها حاکی از آن بود که رابطه خطی بین آغازۀ سازه دوم و سازه دوم واکه هم‌جهت و ضریب همبستگی این رابطه مثبت است؛ یعنی با افزایش سازه دوم واکه، آغازۀ سازه دوم تقریباً در تمامی توالی‌های CV افزایش می‌یابد. سه یافته صوتی مهم از معادله مکانی حاصل از سازه دوم واکه به‌عنوان متغیر مستقل و آغازۀ سازه دوم به‌عنوان متغیر وابسته به‌دست آمد. اول این‌که توزیع مقادیر ضریب شیب و عرض از مبدأ انفجاری‌های واکدار [b, d, g] هم‌پوشی اندکی با هم دارند؛ در نتیجه، حوزه‌های صوتی مجزایی برای تمایز محل تولید این همخوان‌ها به‌وجود می‌آید. در مقابل، مقادیر ضریب شیب و عرض از مبدأ معادله مکانی انفجاری‌های بی‌واک [p, t, k] هم‌پوشی قابل‌توجه‌ای دارند که مانع از آن می‌شود حوزه‌های صوتی مجزایی برای طبقه‌بندی محل تولید آنها شکل بگیرد. پس، معادله مکانی تخمین معتبرتری از محل تولید

انفجاری‌های واکدار [b, d, g] در مقایسه با انفجاری‌های بی‌واک [p, t, k] به‌دست می‌دهد. این یافته با نتایج به‌دست‌آمده برای ترکی استانبولی هماهنگ است (جدول ۲). یافته‌های آکدمیر و دیگران (2012) نشان داده است توزیع مقادیر شیب، عرض از مبدأ و ضریب همبستگی معادله مکانی برای انفجاری‌های واکدار [b, d, g] در مقایسه با انفجاری‌های بی‌واک [p, t, k] فاصله بیشتری از یکدیگر دارند. ازسوی دیگر، الگوی کلی توزیع مقادیر برای انفجاری‌های واکدار ترکی آذری با زبان فارسی نیز شباهت دارد. مثلاً، مقدار شیب خط رگرسیون همخوان لبی /b/ در زبان ترکی، همچون آنچه مدرسی قوامی و دیگران (2005) برای زبان فارسی گزارش کرده‌اند، بیشتر از همخوان لثوی /d/ است؛ مقدار شیب همخوان بدنه‌ای /g/ نیز به مقدار شیب همخوان بدنه‌ای /g/ در زبان فارسی (Modarresi Ghavami et al. 2005) بسیار نزدیک است.

یافته دیگر پژوهش این بود که شدت هم‌تولیدی انفجاری-واکه برحسب میزان وابستگی آغازۀ سازه دوم به سازه دوم واکه در انفجاری‌های بی‌واک از انفجاری‌های واکدار بیشتر است. این یافته با نتایج به‌دست‌آمده برای ترکی استانبولی هماهنگی بیشتری دارد. در جدول ۲ مشاهده می‌شود که شیب معادله کانونی همخوان‌های بی‌واک /t/ و /p/ در ترکی استانبولی مطابق با یافته‌های آکدمیر و دیگران (2012) از جفت واکدارشان /d/ و /b/ تندتر است. ولی /k/ بر خلاف ترکی آذری شیب کندتری از /g/ دارد. به‌طور کلی، شیب و ضرایب همبستگی در همخوان‌های بی‌واک هر دو گونه ترکی نسبت به جفت واکدارشان بیشتر است. این یافته با نتایج به‌دست‌آمده برای زبان‌های فارسی و انگلیسی هماهنگ نیست که در آنها میانگین شیب و ضریب همبستگی معادله مکانی برای انفجاری‌های بی‌واک کمتر از جفت واکدارشان گزارش شده است (جدول ۲).

یافته پایانی مربوط به شیب معادله مکانی انفجاری‌های بدنه‌ای [k, g] است که در مقایسه با انفجاری‌های لبی و تیغه‌ای کمتر است. به‌طور کلی، استدلال شده است که چون واکه‌ها و انفجاری‌های بدنه‌ای هر دو با بدنه زبان تولید می‌شوند، بنابراین، انفجاری‌های بدنه‌ای باید با واکه‌های بعد از خود همگونی بیشتری داشته باشند و، از این رو، شیب معادله مکانی [k, g] باید از [b, p] و [d, t] تندتر باشد. اما، این نتیجه در پژوهش حاضر محقق نشد. نکته جالب این است که شیب انفجاری‌های بدنه‌ای [k, g] برای زبان‌های دیگر نیز مطابق جدول ۲ به‌طور نظام‌مند تندتر از

بقیه انفجاری‌ها گزارش نشده است که نشان می‌دهد یا فرضیه مربوطه باید بازنگری شود و یا فرضیه را با داده‌های بیشتری از زبان‌های دیگر ارزیابی کرد.

جدول ۲ پارامترهای معادله مکانی انفجاری‌های زبان‌های ترکی آذری، ترکی ترکیه، فارسی و انگلیسی: شیب (a)، عرض از مبدأ (b) و ضریب همبستگی (R^2)

انگلیسی	فارسی	ترکی	آذری		
۰/۸۰	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹۰	a	b
۲۱۹	۸۴/۱۵	۶۰	۷۶/۳۲	b	
۰/۹۵	۰/۹۵		۰/۹۳	R^2	
۰/۴۱	۰/۵۰	۰/۷۰	۰/۷۸	a	d
۱۱۰۱	۹۶۹	۵۰۴	۴/۳۷	b	
۰/۷۳	۰/۷۶		۰/۷۸	R^2	
۰/۸۹	۱/۰۰	۱/۰۷	۱/۰۵	a	g
۳۴۳	۹۴/۳۸	-۶۱/۱	-۱۷/۶۳	b	
۰/۸۹	۰/۹۱		۰/۹۱	R^2	
۰/۶۴	۰/۶۹	۱/۰۱	۰/۹۳	a	p
۴۹۰	۴۱۸	-۳۳/۹	۹۰/۳۷	b	
۰/۸۸	۰/۸۷		۰/۹۴	R^2	
۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۹۰	۰/۹۴	a	t
۱۴۳۹	۱۳۵۹	۱۸۳	۱/۲۷	b	
۰/۵۳	۰/۴۴		۰/۹۲	R^2	
۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۲	a	k
۳۲۰	۲۴۶	۷۴/۲	۲/۳۱	b	
۰/۸۷	۰/۸۳		۰/۸۸	R^2	

منابع

بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۹۲)، نظام آوایی زبان فارسی، تهران، سمت.
 صادقی، وحید (۱۳۸۵)، پایان‌نامه دکتری، «بازشناسی واجی کلمات فارسی: رویکردی مبتنی بر نظریه بهینگی»،
 به راهنمایی محمود بی‌جن‌خان، دانشگاه تهران.

مدرسی قوامی، گلناز (۱۳۹۱)، «سیگنال آکوستیکی: تنوع یا ثبات؟»، مجموعه مقالات نخستین هم‌اندیشی آواشناسی آزمایشگاهی، تهران، انجمن زبان‌شناسی ایران.

- Akdemir, E., I. Ozbek, T. Çiloglu (2012), "Locus Equations for Turkish Plosives, 20th Signal Processing and Communications Applications Conference", *Proceedings of SIU*, Istanbul, Turkey.
- Boersma, P. & D. Weenink (2021), *Praat: doing phonetics by computer [Computer program]* Version 6.1.08, retrieved from <http://www.praat.org/>.
- Delattre, P.C., A.M. Liberman & F.S. Cooper (1955), "Acoustic Loci and Transitional Cues for Consonants", *Journal of the Acoustical Society of America* 27, pp. 769-773.
- Krull, D. (1988), *Acoustic Properties as Predictors of Perceptual Properties*, Phonetic Experimental Research at the Institute of Linguistics, University of Stockholm (PERILUS), VII, pp. 66-70.
- Krull, D. (1989), *Consonant-vowel Coarticulation in Spontaneous Speech and in Reference Words*. PERIL US, 10, pp. 101-105, Stockholm, University of Stockholm, Institute of Linguistics.
- Lindblom, B. (1963), "Spectrographic Study of Vowel Reduction", *Journal of the Acoustical Society of America* 35, pp. 783-807.
- Modarresi Ghavami, G. (2002), *The Effects of Syllable Boundary, Stop Consonant Closure Duration, and VOT on VCV Coarticulation*, PhD dissertation, University of Austin, Texas, USA.
- Modarresi Ghavami, G., H. M. Sussman, B. Lindblom, E. Burlingame (2005), "Locus Equation Encoding of Stop Place: revisiting the voicing/VOT issue", *Journal of Phonetics*, 33, pp. 101-113.
- Stevens, K. N. (1998), *Acoustic Phonetics*, Cambridge, MA, MIT Press.
- Sussman, H. M. and J. Shore (1996), "Locus Equations as Phonetic Descriptors of Consonantal Place of Articulation", *Perception & Psychophysics*, 58(6), pp. 936-946.
- Sussman, H. M., D. Fruchter, J. Hilbert, & J. Sirosh (1998), "Linear Correlates in the Speech Signal", *Behavioral and Brain Sciences* 21, pp. 241-299.

References

Sources are in Persian unless otherwise specified.

- Bijankhan, Mahmoud (2013), *Phonetic System of the Persian Language*, Tehran, SAMT.
- Modarresi Ghavami, Golnaz. (2012), "Acoustic Signal: Variability or Stability?", *Proceedings of the First Conference on Experimental Phonetics*, Linguistics Society of Iran.
- Sadeghi, Vahid (2006, PhD dissertation), "Spoken Word Recognition in Persian: An Optimality Treatment", Mahmoud Bijankhan (ed.), University of Tehran.

