



## بررسی آزمایشگاهی واکه [a] در زبان فارسی بر اساس نظریه آواشناسی فانت

غزال یاس فرد<sup>۱</sup>

### چکیده

محققان و زبان‌شناسان ایرانی از نظر تولیدی واکه [a] در زبان فارسی را واکه‌ای پسین، افتاده و سخت توصیف کرده‌اند. علاوه بر آن، جزایری (۱۶:۱۹۶۱) و ثمره (۸۷:۱۳۷۸) در توصیف تولیدی این واکه، ویژگی گرد بودن را نیز علاوه بر پسین، افتاده و سخت بودن آن برشمرده‌اند. به لحاظ بررسی‌های آواشناسی فیزیکی، بی‌جن‌خان (۳۵:۱۳۷۴) در تحلیل سازه‌های واکه [a] فرکانس سازه اول این واکه را ۶۱۹ هرتز و فرکانس سازه دوم آن را ۱۱۶۷ هرتز محاسبه کرده‌است؛ همچنین، سپنتا (۵۷:۱۳۷۷) فرکانس سازه اول این واکه را ۶۸۰ هرتز و سازه دوم آن را ۱۱۰۰ هرتز به‌دست آورده است. اما در آنچه که فانت (۶۷:۱۹۶۰) در بازسازی سازه‌های واکه [a] در زبان انگلیسی ارائه داده است، فرکانس‌های سازه ۱ و ۲ به ترتیب ۷۸۰ هرتز و ۱۲۴۰ هرتز می‌باشد. استفاده از نظریه مدل لوله‌ای فانت در بازسازی سازه‌های این واکه پسین افتاده مشکلی ایجاد نمی‌کند. اما اگر بخواهیم با استفاده از فرکانس سازه‌های واکه مورد نظر در فارسی به طول دو لوله تشکیل دهنده مجرای گفتار در تولید این واکه برسیم با پیش‌بینی اشتباه روبرو خواهیم شد. بنابراین، به نظر می‌رسد که شکل مجرای گفتار در تولید واکه [a] در زبان فارسی با معادل آن در زبان انگلیسی متفاوت است. در این پژوهش، سعی شده‌است از طریق روش تصویربرداری سی تی اسکن، اندازه سطوح مورد نیاز برای محاسبه سازه‌های این واکه فراهم گردد که پیامد آن، مدل پیشنهادی مجرای گفتار واکه [a] در زبان فارسی می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** واکه [a]، سازه، مجرای گفتار، نظریه فانت، مدل لوله‌ای.

## مقدمه

صوت<sup>۱</sup> حاصل ارتعاش<sup>۲</sup> است و ارتعاش نیز خود حاصل نوعی حرکت است. اما برای تولید صوت، ارتعاش به تنهایی کافی نیست و به یک رسانه<sup>۳</sup> انتشار<sup>۴</sup> نیز نیاز است؛ یعنی چیزی که صوت بتواند در آن از جایی به جای دیگر حرکت کند. این رسانه در اغلب اوقات هواست، اما هر ماده<sup>۵</sup> فیزیکی دیگری نیز می‌تواند نقش رسانه ایفا کند. آواهای زبانی<sup>۶</sup> نیز همانند هر صوت دیگری نیازمند یک منبع ایجاد ارتعاش و یک رسانه‌اند. رسانه آواهای زبانی هواست و منبع ایجاد ارتعاش، حرکت اندام‌های گفتاری می‌باشد. به عبارت دیگر، هوا باید در مجرای گفتار<sup>۷</sup> به حرکت درآید و در مسیر آن تغییراتی ایجاد شود تا آواهای زبانی تولید گردند (گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۲۷).

فرایند تولید آوا به سه بخش عمده تقسیم می‌شود: منبع<sup>۸</sup> صدا، تولید صدا و خروجی صدا<sup>۹</sup>. منبع صدا محلی است در مجرای گفتار که هوای برآمده از منبع فعالیت آغازین، برای اولین بار در آنجا دستخوش تغییرات هواپویایی<sup>۱۰</sup> می‌گردد و در نتیجه موج منبع صدا پدید می‌آید. بنابراین، اگر منبع فعالیت آغازین را شش‌ها<sup>۱۱</sup> و جهت جریان هوا<sup>۱۲</sup> را برون‌سو<sup>۱۳</sup> فرض کنیم، منبع صدا محلی است در حد فاصل حنجره تا لب‌ها، که در آنجا هوای برون‌سوی ششی<sup>۱۴</sup> دچار تغییر و تحول می‌شود. منبع صدا بر دو نوع است: منبع واک‌دار<sup>۱۵</sup> و منبع بی‌واک<sup>۱۶</sup> (محمود بی‌جن‌خان، ۱۳۶۹: ۶۷).

بی‌جن‌خان (۱۳۶۹: ۷۴) در توصیف چگونگی تولید صدا بیان می‌کند که نتیجه فعالیت منبع صدا، موج صوتی است که پس از تولید وارد حفره‌های مجرای گفتار می‌شود. نقش مجرای گفتار این است که صدای تولید شده در منبع واک‌دار یا بی‌واک یا هر دو را به صدای پیچیده‌تری تبدیل می‌کند. بنابراین، موج صدای حاصل از منبع صدا به مثابه ماده<sup>۱۷</sup> خام برای مجرای گفتار است. این مجرا نقش خود را با تغییرات در ساختمان هندسی‌اش و در نتیجه تولید بازخوان‌های<sup>۱۸</sup> صوتی انجام می‌دهد و همانند لوله‌ای استوانه‌ای شکل با سطح مقطع‌های متغیر است که ابتدای آن حنجره و انتهایش لب‌ها هستند، به اضافه یک شاخه فرعی به نام حفره بینی. طول این لوله در مردان حدوداً ۱۷ سانتی‌متر است که با بالا و پایین رفتن حنجره از یک سو و تغییر

1. sound
2. vibration
3. propagating medium
4. speech sound
5. vocal tract
6. source
7. sound radiation
8. aerodynamic
9. lungs
10. airstream
11. egressive
12. pulmonic
13. voiced
14. voiceless
15. resonantes

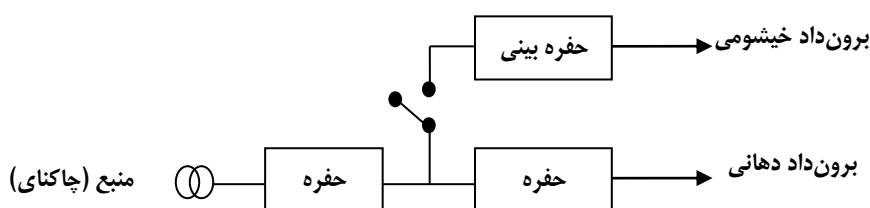
شکل لب‌ها از سوی دیگر، طول آن به هنگام تولید آواها تغییر می‌کند. طول حفره حلق با بالا و پایین رفتن حنجره از یک سو و نرمکام از سوی دیگر تغییر می‌کند. حجم حفره دهان به عنوان مهم‌ترین بخش مجرای گفتار، همچنین طول و شکل آن با تغییر مکان نرمکام، زبان، لب‌ها و فک پایین متغیر است.

## نظریه‌های آکوستیکی گفتار

### نظریه منبع - صافی<sup>۱</sup>

صرف نظر از توصیف تولیدی واک، به لحاظ آواشناسی آکوستیکی (فیزیکی)، گفتار حاصل تعامل یک منبع و یک صافی<sup>۲</sup> است که به صوت ایجاد شده شکل یا طنین می‌دهد. ارتعاش پرده‌های صوتی<sup>۳</sup> منبع اصلی صوت در واکنش‌هاست و مجرای گفتار یک صافی آکوستیکی به شمار می‌رود که صوت ایجاد شده توسط پرده‌های صوتی را تقویت می‌کند. این روایت آکوستیکی را تحت عنوان «نظریه منبع - صافی تولید گفتار»<sup>۴</sup> می‌شناسیم (گونار فانت<sup>۵</sup>، ۱۹۶۰؛ به نقل از کیت جانسون<sup>۶</sup>، ۲۰۰۳: ۷۹).

در شکل ۱ به صورت خلاصه، تولید صوت از یک منبع چاکنایی نشان داده شده است.



شکل ۱. تولید صوت از یک منبع چاکنایی

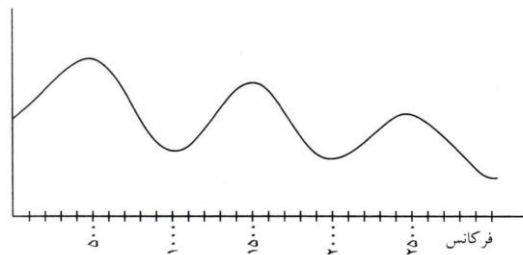
(برگرفته از گونار فانت، ۱۹۶۰: ۱۶)

از سوی دیگر، صوت حاصل از موج گفتار<sup>۷</sup> می‌تواند پاسخ سیستم‌های صافی مجرای گفتار به بیش از یک منبع صوتی باشد. در شرایطی که دهان را حفره پیشین<sup>۸</sup> و حلق را حفره پسین<sup>۹</sup> در نظر بگیریم، این جداسازی به هر دوی آنها این امکان را می‌دهد که به‌عنوان منبع صوت در نظر گرفته شوند (گونار فانت، ۱۹۶۰: ۱۵).

1. Source- Filter theory
2. filter
3. vocal fold
4. Source- filter theory of speech production
5. Gunnar Fant
6. Keith Johnson
7. speech wave
8. front cavity
9. back cavity

در چارچوب این نظریه، تولید آواهای گفتار محصول عملکرد منبع آوا و صافی دستگاه گفتار بر روی جریان هواست. بنابراین، تولید آوای گفتار یک فرایند دو مرحله‌ای است. ابتدا در محلی از دستگاه گفتار که به آن منبع گفته می‌شود، فعالیت اندام‌های گویایی منجر به تولید صدا می‌شود. در همین حال، ابعاد حفره‌های بازخوانی<sup>۱</sup> یعنی حلق و دهان، متناسب با فعالیت اندام‌های گویایی تغییر می‌کند و صافی دستگاه گفتار شکل می‌گیرد. صدایی که در منبع به وجود می‌آید، از درون صافی عبور می‌کند و آوای گفتار تولید می‌شود. منبع آوا در تولید واکه، چاکنای (یا حنجره) است. در اثر تغییر سرعت حجمی<sup>۲</sup> هوا در چاکنای، تارآواها به طور منظم باز و بسته می‌شوند. باز و بسته شدن متوالی یا ارتعاش تارآواها، منجر به تولید صدایی می‌شود که وا که نام دارد. موج صوتی حاصل از ارتعاش تارآواها یک موج شبه منظم<sup>۳</sup> است، چون یک الگوی تراکم<sup>۴</sup> و رقت<sup>۵</sup> مولکولی هوا در واحد زمان تکرار می‌شود. صافی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت شنیداری وا که دارد زیرا حفره‌های دهان و حلق به مثابه حفره‌های بازخوانی هستند که فرکانس‌های مشخصی را تشدید می‌کنند. فرکانس‌های بازخوانی حفره‌های دهان و حلق را سازه<sup>۶</sup> گویند که ممیز وا که‌ها از همدیگر هستند (محمود بی‌جن‌خان، ۱۳۹۲: ۹۵-۹۴).

بنابر آنچه گفته شد، ویژگی‌های صافی با تغییر شکل آن تغییر می‌کند. برای مثال، مجرای دهان در حالت باز و خنثی (همانند وضعیت تولید وا که مرکزی میانی [ə]) فرکانس‌هایی را که در طیفی نظیر طیف شکل ۲ قرار گرفته باشند تقویت می‌کند. چنین طیفی را اصطلاحاً «تابع انتقال مجرای گفتار<sup>۷</sup>» می‌نامند. تابع انتقال (یا تابع تبدیل) شاخص ریاضی است که نسبت درون‌داد و برون‌داد یک سامانه خطی دارای متغیر زمان را نشان می‌دهد. تابع انتقال مجرای گفتار عبارت است از نسبت شدت صوت در هنگام باز شدن دهان (برون‌داد) به فشار صدای منبع (درون‌داد) (گلناز مدرسی‌قوامی، ۱۳۹۰: ۱۳۲).

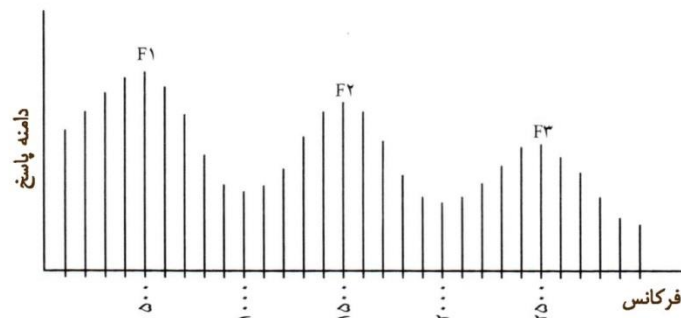


شکل ۲. تابع انتقال مجرای گفتار در حالت خنثی

(بر گرفته از [www.umanitoba.ca](http://www.umanitoba.ca)؛ به نقل از گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۱۳۲)

1. resonance cavity
2. volume velocity
3. quasi-periodic wave
4. compression
5. rarefaction
6. formant
7. vocal tract transfer function

حال اگر هوایی که در پرده‌های صوتی مرتعش شده به مجرای دهان در وضعیت خنثی برسد، فرکانس هماهنگ‌های آن در ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ هرتز تقویت می‌شود، زیرا مجرای دهان در آن وضعیت خاص این فرکانس‌ها را تقویت یا تشدید می‌کند. تأثیر شکل مجرای گفتار بر هوای مرتعش شده در حنجره را می‌توان در طیف برون‌داد<sup>۱</sup> شکل ۳ دید (گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۱۳۲).



شکل ۳. طیف برون‌داد

(برگرفته از [www.umanitoba.ca](http://www.umanitoba.ca); به نقل از گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۱۳۳)

همان‌طور که در شکل ۳ می‌بینیم، شکل مجرای گفتار در حالت خنثی برخی از فرکانس‌های منبع صوت را تقویت کرده است. قله‌های انرژی که در طیف برون‌داد دیده می‌شوند، سازه هستند. نخستین قله را سازه ۱ ( $F_1$ )، دومین قله را سازه ۲ ( $F_2$ ) و سومین قله را سازه ۳ ( $F_3$ ) می‌نامند. همان‌طور که گفته شد، سازه‌ها در تشخیص واکه‌ها و همخوان‌هایی که منبع تولید آنها واک است نقش مهمی ایفا می‌کنند. برای مثال، در تولید انواع واکه، بسته به اینکه شکل مجرای گفتار و تابع انتقال آن چه باشد، هماهنگ‌های متفاوتی در طیف برون‌داد تقویت می‌شوند و هر واکه الگوی سازه‌ای خاص خود را می‌یابد (گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۱۳۳).

### مدل لوله‌ای

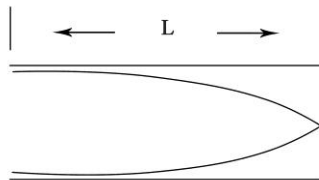
همان‌طور که در «نظریه منبع-صافی» اشاره شد، مجرای گفتار (شامل حفره‌های دهان، بینی و حلق)، نقش صافی را ایفا می‌کند. فانت (۱۹۶۰: ۱۵) این حفره‌ها را به دو بخش حفره جلویی و حفره عقبی که به ترتیب شامل دهان و حلق هستند، تقسیم کرده است. این اصطلاحات به منظور درک بهتر در زمینه مطالعات آواشناسی ارائه شده است. یکی دیگر از امکانات این تقسیم بندی که در بازسازی سازه‌های واکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیربخشی است که محل آن باریک‌ترین مسیر ایجاد شده در مجرای گفتار است. در سایشی‌ها و انسدادی‌ها این منطقه بسیار نزدیک به منبع تولید صوت می‌باشد و لزوماً منطبق بر منبع نیست. اما با توجه به جایگاه تولید واکه‌ها که با بیشترین ارتفاع زبان از دهان تعیین می‌شود، علاوه بر منابع اصلی

1. output spectrum

صوت که بر حسب گرفتگی<sup>۱</sup> در حفره‌های حلق و دهان ایجاد می‌شود، از نظر ملاحظات آکوستیکی گرفتگی‌های متعدد دیگری نیز قابل مشاهده است.

همچنین، طبق نظریه منبع-صافی با در نظر گرفتن مجرای گفتار به شکل یک لوله یکنواخت با سطح مقطعی ثابت مانند آنچه در مورد واکه [ə] صدق می‌کند، امکان پیش‌بینی فرکانس‌های تشدید آن واکه فراهم آمد. بنابراین با در دست داشتن مقادیر سازه‌های این واکه، قادر خواهیم بود که طول مجرای گفتار هنگام تولید [ə] را محاسبه کنیم. در این مدل، مجرای گفتار بازسازی شده شامل یک لوله یک سر بسته در ناحیه چاکنای و یک سر باز در ناحیه لب‌ها می‌باشد (کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۲).

بدین ترتیب، در لوله یک سر بسته‌ای به طول  $L$  الگوی موج تولید شده به صورت شکل ۴ نمایش داده می‌شود:



شکل ۴. لوله یک سر بسته

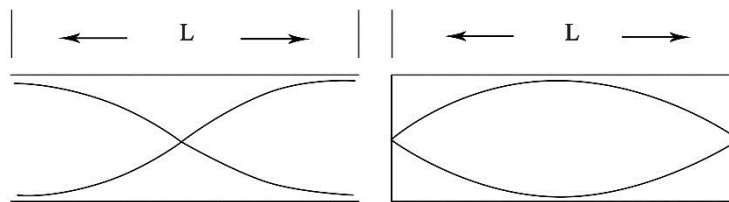
(برگرفته از فرانک.ج. بلت؛ ترجمه محمد خرمی، ۱۳۷۴: ۵۵۲)

برای محاسبه فرکانس‌های تشدید در این لوله از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$F = \frac{(2n-1)c}{4l} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $c$  سرعت صوت برابر با  $35000$  سانتی‌متر در ثانیه است و  $n$  شماره سازه از یک تا هشت است. یعنی در  $F_1$  مقدار  $n=1$ ، در  $F_2$  مقدار  $n=2$  و در  $F_3$  مقدار  $n=3$  و ... می‌باشد.

همچنین در لوله دو سر باز (یا دو سر بسته) به طول  $L$  الگوی موج تولید شده به صورت شکل ۵ نمایش داده می‌شود:



لوله دو سر باز

لوله دو سر بسته

شکل ۵. (برگرفته از فرانک.ج. بلت؛ ترجمه محمد خرمی، ۱۳۷۴: ۵۵۲)

بر طبق نظریه لوله‌های صوتی در فیزیک صوت، مقادیر سازه‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

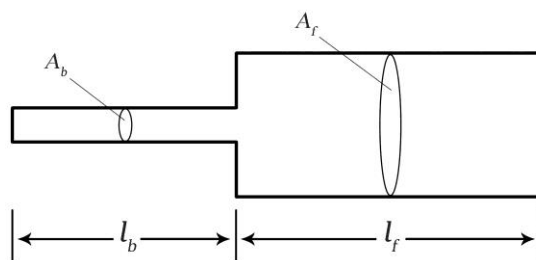
$$F = \frac{nc}{\nu l} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که مقدار  $n$  و  $c$  مانند آنچه که در بالا گفته شد، در نظر گرفته می‌شود (فرانک.ج. بلت؛ ترجمه محمد خرمی، ۱۳۷۴: ۵۵۲-۵۵۳).

اما برای محاسبه مشخصات آکوستیکی سایر واکه‌ها، ضروری است با توجه به گرفتگی‌هایی که در طول مجرای گفتار ایجاد می‌شود، این نظریه را گسترش داد. بنابراین، فرکانسی را که به صورت طبیعی با تولید واکه ایجاد می‌شود، می‌توان با بازسازی مجرای گفتار به صورت مجموعه‌ای از لوله‌های متوالی با سطح مقطع‌های مختلف (مدل لوله‌ای) به دست آورد (کیت جانسون، ۲۰۰۶: ۱۰۲).

در این مدل، مجرای گفتار بازسازی شده شامل یک سر بسته در ناحیه چاکنای و یک سر باز در ناحیه لب‌ها می‌باشد. بسته به محل نزدیک شدن زبان به دیواره حلق یا نرم‌کام، گرفتگی‌های ایجاد شده حجم‌های متفاوتی را برای حفره‌های پسین و پیشین ایجاد می‌کنند. به دنبال این تغییر حجم‌ها، سطح مقطع‌های متفاوت در این حفره‌ها کیفیت واکه‌ها را رقم می‌زنند (گونار فانت، ۱۹۶۰: ۶۷-۶۳).

به‌عنوان مثال، جانسون (۲۰۰۳: ۱۰۴) مجرای گفتار بازسازی شده واکه [a] در زبان انگلیسی را به صورت زیر نمایش داده‌است:



شکل ۶. مدل لوله‌ای بازسازی شده مجرای گفتار هنگام تولید واکه [a]

(برگرفته از کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۴)

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مقادیر مشخص شده به این ترتیب است:

$A_b$  = سطح مقطع حفره پسین و حنجره

$A_f$  = سطح مقطع حفره پیشین

$L_b$  = طول حفره پسین

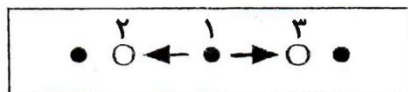
$L_f$  = طول حفره پیشین

بنابراین، با در دست داشتن مقادیر لازم از سطح مقطع‌های مشخص شده می‌توان طول مجرای گفتار

واکه مورد نظر را محاسبه کرد.

### نظریه تداخل<sup>۱</sup>

راه دیگری برای مدل سازی پیامدهای آکوستیکی از گرفتگی‌های مجرای گفتار وجود دارد که به آن «نظریه تداخل» می‌گویند. در این رویکرد، رابطه بین فشار هوا و سرعت، نقش مهمی ایفا می‌کند. این نظریه نخستین بار از سوی شیبای<sup>۲</sup> و کاجی‌یاما<sup>۳</sup> (۱۹۴۱) بیان شد (گونارفانت، ۱۹۶۰: ۸۶). تصور کنید که یک مولکول هوا در جای خود نوسان<sup>۴</sup> می‌کند (شکل ۷).

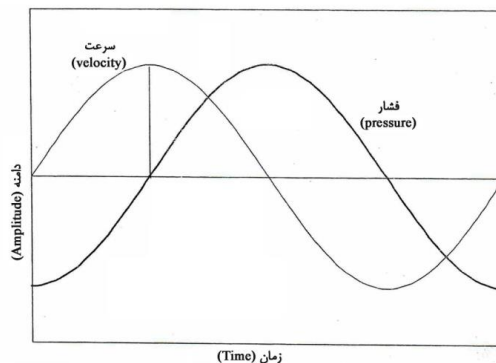


شکل ۷. مدل سازی مراحل نوسان یک مولکول هوا

(برگرفته از کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۸)

هنگامی که این مولکول از نقطه ۱ به طرف نقطه ۲ در حرکت است، با تراکم ذرات هوا در آن نقطه مواجه می‌شود. تراکم ذرات سبب می‌شود که فشار به مقدار بیشینه<sup>۵</sup> خود برسد. این همان جایی است که سرعت حرکت مولکول کمترین مقدار خود را داراست و این مولکول ناگزیر در خلاف جهت اولیه، تغییر مسیر می‌دهد. در این تغییر مسیر به طرف نقطه ۳ ابتدا به نقطه ۱ که به دلیل عدم تراکم ذرات هوا در آنجا فشار کم‌ترین و سرعت بیشترین مقدار خود را دارد، می‌رسد و در ادامه با نزدیک شدن به نقطه ۳ این حرکت نوسانی تکرار خواهد شد (کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۸).

این پدیده فیزیکی در قالب موج سینوسی فشار و موج سینوسی سرعت در شکل ۸ نشان داده شده‌است.



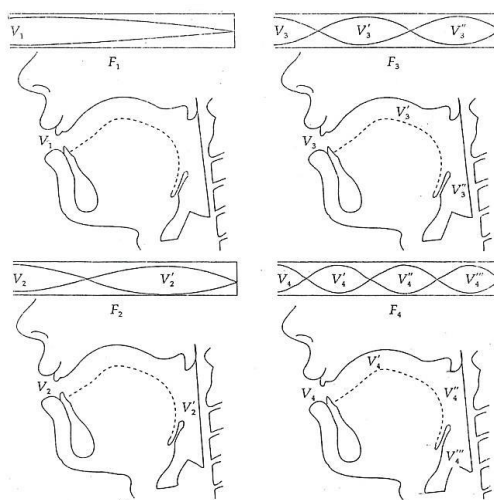
شکل ۸. رابطه بین فشار و سرعت در قالب موج‌های سینوسی

(برگرفته از کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۸)

1. Perturbation theory
2. Chiba.T
3. Kajiyama
4. oscillate
5. maximum



بر این اساس، رابطه بین فشار و سرعت به‌گونه‌ای است که اگر در نقطه‌ای فشار بیشینه باشد، سرعت صفر است و اگر در نقطه‌ای سرعت بیشینه باشد، فشار صفر خواهد بود. از طرفی در شکل ۹ که برگرفته از شیبا و کاجی‌یاما (۱۹۴۱) می‌باشد، الگوی موج سینوسی سرعت در مجرای گفتار و مدل لوله‌ای آن مورد بررسی قرار گرفته است (کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۸).



شکل ۹. تصویر برش عمودی<sup>۱</sup> مجرای گفتار بدون گرفتگی به همراه موج سینوسی سرعت در مدل لوله‌ای آن با سرعت بیشینه ( $V_n$ ) در چهار سازه اول ( $F_n$ ) که در آن  $n$  برابر با شماره سازه می‌باشد (برگرفته از شیبا و کاجی‌یاما، ۱۹۴۱؛ به نقل از کیت جانسون، ۲۰۰۳: ۱۰۹).

در این شکل، تصویر برش عمودی مجرای گفتار در وضعیت خنثی و مدل لوله‌ای آن به صورت لوله یکنواخت یک سر بسته، یک سر باز قابل مشاهده است. چهار سازه اول با نمایه ( $F_n$ ) و سرعت بیشینه با نمایه ( $V_n$ ) نشان داده شده است. همچنین، محل تقاطع موج‌های سینوسی سرعت، نشان دهنده نقاط دارای فشار بیشینه می‌باشند. بر اساس یافته‌های به‌دست آمده از بررسی واژه [θ] طبق «نظریه منبع- صافی»، فشار در طنین‌های طبیعی مجرای گفتار در ناحیه چاکنای بیشینه و در لب‌ها کم‌ترین مقدار خود را داراست. از طرفی، با توجه به رابطه بین فشار و سرعت در شکل ۸ نتیجه می‌گیریم که سرعت در چاکنای به کمترین و در لب‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بدین ترتیب، شیبا و کاجی‌یاما (۱۹۴۱) با استفاده از این یافته‌ها، «نظریه تداخل» را بر حسب چگونگی تأثیر آنها بر ارتباط بین گرفتگی و فرکانس در مجرای گفتار این‌گونه بیان کرده‌اند که: با توجه به انرژی جنبشی<sup>۲</sup> و پتانسیل<sup>۳</sup> موجود در نقاطی که سرعت و فشار بیشینه است ارتباطی بین گرفتگی مجرای گفتار با فرکانس سازه برقرار است. به این معنی که اگر گرفتگی در مجرای

1. sagittal  
2. kinetic  
3. potential

گفتار در جایی اتفاق بیفتد که سرعت بیشینه باشد (انرژی جنبشی بیشینه) حرکت ذرات هوا باز داشته می‌شود و در نتیجه فرکانس در آن نقطه کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر اگر گرفتگی مجرای گفتار در نقطه‌ای که فشار بیشینه (انرژی پتانسیل بیشینه) است اتفاق بیفتد، حرکت ذرات هوا تقویت می‌شود و پیامد آن افزایش فرکانس خواهد بود. این تأثیرات گرفتگی‌ها بر فرکانس‌های سازه‌های مجرای گفتار به دو قانون زیر خلاصه می‌شود:

۱. گرفتگی در مجرای گفتار در نزدیکی جایی که سرعت بیشینه است، فرکانس سازه را کاهش می‌دهد.
۲. گرفتگی در مجرای گفتار در نزدیکی جایی که فشار بیشینه است، فرکانس سازه را افزایش می‌دهد (کیت جانسون، ۲۰۰۶: ۱۱۰-۱۰۸).

### ویژگی‌های آکوستیکی (فیزیکی) واکه [a]

در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی واکه [a] در زبان فارسی پرداخته شده است. سعی شده است تا مبانی این بررسی در چارچوب نظریه‌های آکوستیکی گفتار بیان شود.

فانت با تحقیق بر روی طیف آواها به نتایج جالب توجهی دست یافت. وی در این رابطه اذعان می‌کند که در مواردی چون ضعیف بودن سازه‌ها و تداخل سازه‌ها با یکدیگر، تشخیص  $F_1$ ،  $F_2$ ،  $F_3$  و  $F_4$  از یکدیگر مشکل می‌شود. او درباره ویژگی‌های فیزیکی مجرای گفتار به هنگام تولید واکه [a] چنین می‌گوید:

" در تولید واکه [a] محل تولید که در ۴ سانتی‌متری حنجره قرار دارد و فرکانس سازه‌ها برابر است با:

$$F_1 = 600\text{ Hz} \quad F_2 = 1000\text{ Hz} \quad F_3 = 2600\text{ Hz} \quad F_4 = 3450\text{ Hz}$$

تنگ شدن حلق یکی از ویژگی‌های ضروری واکه [a] است» (محمود بی‌جن‌خان، ۱۳۶۹: ۹۱).

همچنین سپنتا (۱۳۷۷: ۵۷) فرکانس سازه‌های واکه [a] را طبق جدول مشخصات واکه‌های زبان فارسی بر حسب مشخصه‌های یاکوبسن<sup>۱</sup>، فانت و هله<sup>۲</sup> (۱۹۵۲) و یاکوبسن و هله (۱۹۵۶) به صورت زیر بیان کرده است:

$$F_1 = 680\text{ Hz} \quad F_2 = 1100\text{ Hz} \quad F_3 = 1600\text{ Hz}$$

او ویژگی‌های فشرده<sup>۳</sup>، فرونوا<sup>۴</sup>، بملی شده<sup>۵</sup> و پیوسته<sup>۶</sup> را برای واکه [a] برشمرده است.

آنچه که در مطالعات زبان‌شناسان و محققان در مورد واکه [a] در زبان فارسی به دست آمده است، نشان می‌دهد که همه آنها از نظر تولیدی واکه [a] را واکه‌ای پسین، افتاده، و سخت توصیف کرده‌اند. علاوه بر آن، ثمره (۱۳۷۸) و جزایری (۱۹۶۱) ویژگی گرد بودن را نیز به مشخصه‌های قبلی افزوده‌اند. به لحاظ بررسی‌های آواشناسی فیزیکی بی‌جن‌خان (۱۳۷۴) در تحلیل سازه‌های واکه [a] به دست آمده، فرکانس سازه اول این

1. R. Jakobson
2. M. Halle
3. compact
4. grave
5. flat
6. continuant

واکه ۶۱۹ هرتز و فرکانس سازهٔ دوم آن ۱۱۶۷ هرتز محاسبه شده است. همچنین، سینتا (۱۳۷۷) این مقادیر را در مورد فرکانس اول و دوم واکه در زبان فارسی به ترتیب ۶۸۰ هرتز و ۱۱۰۰ هرتز به دست آورده است. در این پژوهش، سعی شده است تا براساس نظریه‌های آکوستیکی گفته شده در بخش ۲، مشخصات فیزیکی و مطالعهٔ آزمایشگاهی این واکه به توصیف وضعیت مجرای گفتار در تولید آن پرداخته شود. بدین منظور با مطالعهٔ آزمایشگاهی این واکه از طریق روش تصویربرداری سی‌تی‌اسکن<sup>۱</sup> شکل پیشنهادی مجرای گفتار در تولید این واکه افتاده پسین به گونه‌ای به دست آمده است که با نظریه‌های گفته شده قابل تبیین است.

### روش‌شناسی

در پژوهش حاضر، سعی شده است با استفاده از روش تصویربرداری سی‌تی‌اسکن اندازهٔ سطوح مورد نیاز در توصیف وضعیت مجرای گفتار هنگام تولید این واکه فراهم گردد.

برتری استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های دیگر مانند رادیولوژی<sup>۲</sup> و ام‌آرآی<sup>۳</sup> در عدم استفاده از ماده حاجب و کوتاه بودن زمان تصویربرداری است؛ به گونه‌ای که اگر به جای این روش از شیوه ام‌آرآی استفاده می‌شد، طول زمان آزمایش به حدود ۱۵ دقیقه افزایش می‌یافت که در آن صورت تولید یکنواخت واکه مورد نظر توسط گویشوران امکان‌پذیر نبود. همچنین بافت‌های نرم در روش سی‌تی‌اسکن به وضوح قابل مشاهده است و اندازه‌گیری سطوح مورد نیاز توسط نرم‌افزارهای دقیق و پیشرفته قابل محاسبه می‌باشند.

### آزمودنی‌ها

بخش‌هایی که برای بررسی شکل مجرای گفتار در تولید واکه [a] و محاسبهٔ طول مجرای گفتار در این هنگام، مورد مطالعه قرار گرفتند، عبارت‌اند از: قسمت فوقانی گردن، حلق، دهان و بینی که تصویربرداری از آنها حین تولید واکه مورد نظر حدود ۳ ثانیه به طول انجامید. با توجه به عوارض این روش، انتخاب گویشوران از بیمارانی که به منظور انجام امور درمانی خود به مرکز تصویربرداری بیمارستان (ش-ت) مراجعه کرده بودند، صورت گرفت. برای به دست آوردن داده‌های مورد نظر (که شامل اندازه دقیق سطوح مورد نیاز مانند قطر مجرای گفتار، قطر و طول حفره‌های پسین و پیشین بوده است) در این پژوهش، از ۳ داوطلب مرد در بازه سنی ۲۰ تا ۳۰ سال خواسته شد تا در حین تصویربرداری از نواحی گفته شده، واکه [a] را تولید کنند. همچنین، هیچ‌یک از آنها از جزئیات و هدف آزمایش آگاه نبود.

1. CT scan

2. X-ray

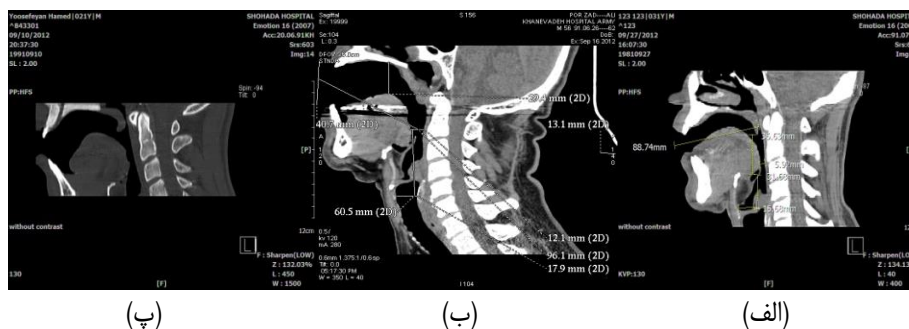
3. MRI

### ابزار اندازه‌گیری

برای بررسی شکل مجرای گفتار از دستگاه اسپیرال<sup>۱</sup> سی‌تی‌اسکن زیمنس<sup>۲</sup>، مدل ایموشن<sup>۳</sup> ۲۰۰۶ استفاده شد که شیوه تصویربرداری آن ۱۶ اسلایس<sup>۴</sup> از منطقه موردنظر بود. نرم افزار تجزیه و تحلیل تصاویر، نرم‌افزار سینگو<sup>۵</sup> ۲۰۰۷ بود که با همکاری یک کارشناس رادیولوژی از بیمارستان ش-ت مورد استفاده قرار داده شد. نوع تصویر اسپیرال بافت نرم بود که در جهت محوری<sup>۶</sup> انجام شد. همچنین برای مطالعه تصاویر لازم بود که آنها در جهت برش عمودی<sup>۷</sup> بازسازی شوند. همان‌طور که در بخش ۴-۱ به آن اشاره شد، نواحی که تحت سی‌تی‌اسکن قرار گرفتند، عبارت بودند از قسمت فوقانی گردن، حلق، دهان و بینی.

### تحلیل داده‌ها

این بخش شامل تصاویر مجرای گفتار شرکت‌کننده‌های پژوهش هنگام تولید واکه [a] و جدول مشخصات هندسی آن می‌باشد. با توجه به هدف پژوهش حاضر برای بررسی وضعیت مجرای گفتار در تولید واکه مورد نظر و بازسازی فرکانس‌های تشدید این واکه مانند آنچه جانسون (۲۰۰۳: ۱۰۴) در بخش ۲-۲ این پژوهش از واکه [a] در زبان انگلیسی ارائه کرده‌است، باید مشخصات هندسی مجرا را در هر آزمودنی به دست آوریم. بنابراین، همان‌طور که در مجموعه تصاویر شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، اندازه سطوح مورد نیاز محاسبه شده است.

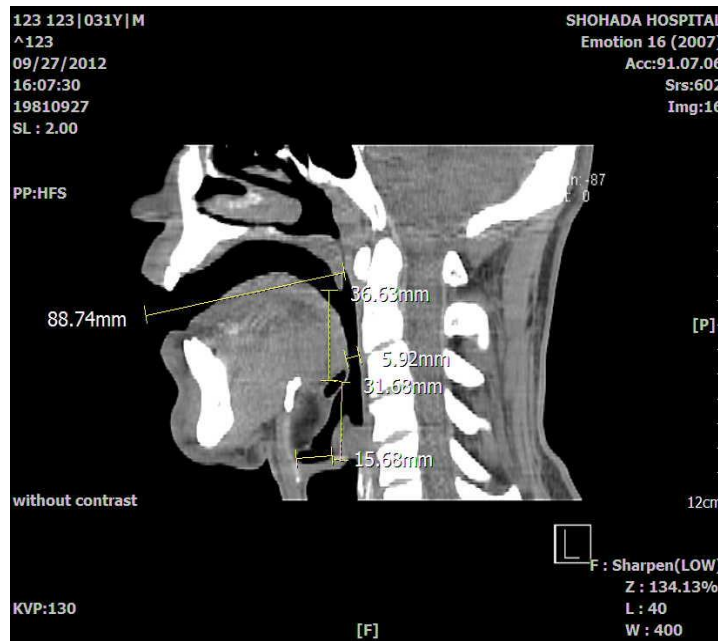


شکل ۱۰. مجموعه تصاویر آزمودنی‌های (الف، ب، پ) هنگام تولید واکه [a]

در شکل ۱۰ مجموعه تصاویر آزمودنی‌های پژوهش به ترتیب با حروف الف، ب و پ نمایش داده شده است. همان‌طور که در هر سه تصویر نمایان است، هنگام تولید واکه [a] عقب زبان به دیواره حلق نزدیک شده‌است. همچنین، برآمدگی زبان (بخش پسین زبان) در زیر نرم‌کام به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. نکته

1. spiral
2. siemens
3. emotion
4. slice
5. syngo
6. axial
7. sagittal

دیگری که در هر سه تصویر دیده می‌شود افتاده بودن بدنه زبان که نشان دهنده فاصله زبان با سقف دهان است می‌باشد. و در نهایت وضعیت دهان در تولید این واکه پسین افتاده در هر سه تصویر کاملاً باز است. در شکل ۱۱ شرکت کننده الف هنگام تولید واکه مورد نظر به همراه مشخصات هندسی مجرای گفتار او مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱. تصویر مجرای گفتار از شرکت کننده (الف) هنگام تولید واکه [a] و مشخصات هندسی آن

با استفاده از اندازه‌های به دست آمده از هر آزمودنی، در جدول شماره ۱ مقادیر لازم جهت محاسبه طول مجرای گفتار به شرح زیر ارائه شده است (برای سهولت محاسبه، مقادیر از میلی‌متر به سانتی‌متر تبدیل شده‌اند):

جدول ۱. مشخصات هندسی تصاویر سی‌تی‌اسکن هنگام تولید واکه [a]

تصویر	قطر حنجره cm	سطح مقطع حنجره ( $A_1$ ) $cm^2$	قطر مجرای گرفته شده cm	سطح مقطع مجرای گرفته شده ( $A_2$ ) $cm^2$	$l_1$ cm	$l_2$ Cm	طول حفره پیشین $l_f$ cm
الف	۱/۵۶	۱/۹	۰/۵۹	۰/۲۷	۳/۱	۳/۶	۸/۸
ب	۱/۵۵	۱/۸	۰/۵۸	۰/۲۹	۳/۴	۳/۵	۸/۷
پ	۱/۶۱	۲	۰/۶۲	۰/۳۱	۳/۳	۳/۶	۸/۷

همان طور که می‌دانیم، با داشتن قطر حنجره و مجرای گرفته شده می‌توانیم اندازه سطح مقطع آنها را با در نظر گرفتن سطح مقطع مجرای گفتار به شکل دایره، از رابطه  $A=\pi r^2$  به دست آوریم. این مقادیر در بخش نهایی پژوهش (نتیجه‌گیری) و نمایش شکل پیشنهادی مجرای گفتار هنگام تولید واکه مورد نظر به کار گرفته می‌شوند.

با توجه به چارچوب نظری این پژوهش، برای مطالعه واکه [a] در زبان فارسی و اینکه شکل مجرای گفتار در هنگام تولید این واکه چگونه است، به بررسی شواهد زیر می‌پردازیم:

### شاهد آزمون سی‌تی‌اسکن

حفرة حلق یکی از سه حفرة تشکیل دهنده مجرای گفتار است که نقش زبانی تشدیدگر صوت<sup>۱</sup> را ایفا می‌کند. این مجرای نسبتاً طولانی به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود:

۱. حفرة حنجره-حلق<sup>۲</sup> بین چاکنای و دریچه نای قرار گرفته است.
۲. حفرة دهان-حلق<sup>۳</sup> بین دریچه نای و ملاز واقع شده است.
۳. حفرة بینی-حلق<sup>۴</sup> از نرم‌کام شروع شده و به حفرة بینی باز می‌شود. این بخش با بسته شدن نرم‌کام از سایر بخش‌های حلق جدا می‌شود (گلناز مدرسی قوامی، ۱۳۹۰: ۲۳-۲۲)

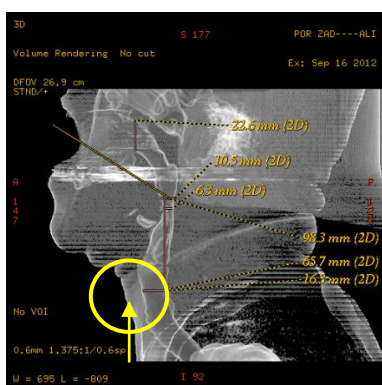
با توجه به مطالب بالا و مجموعه تصاویر شکل‌های ۱۱، ۱۰ و ۱۲ نکات زیر قابل ملاحظه است:



شکل ۱۲. مجرای گفتار هنگام تولید واکه [a]

1. sound resonator
2. laryngo-pharynx
3. oro-pharynx
4. naso-pharynx

۱. سه بخش حفره حلق را می‌توان به وضوح مشاهده کرد.
۲. بخش ۱ (عقب حفره حنجره- حلق) با وجود نزدیک شدن عقب زبان به دیواره حلق توانسته است به صورت مستقل، حجم خود را حفظ نماید. به این معنا که گرفتگی در حفره پسین بطور یکنواخت اتفاق نمی‌افتد.
۳. مجموع طول بخش‌های ۱ و ۲ (حفره پسین) در حدود ۷ سانتی‌متر است.
۴. ایجاد گرفتگی یا نزدیک شدن زبان هنگام تولید واکه [a] در حدود ۴ سانتی‌متری از چاکنای اتفاق افتاده است (گونار فانت، ۱۹۶۰: ۸۹).
۵. طول کلی مجرای گفتار در حدود ۱۶ سانتی‌متر است.
۶. تصویر شکل ۱۳ که در وضعیت سه بعدی بازسازی شده است، عبور جریان هوا را بدون هیچ مانعی نشان می‌دهد. این بدان معنی است که ناحیه مشخص شده در تصویر شکل ۱۴ به علت بافت ویژه خود در جریان هوا اختلالی ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۳. تصویر سه بعدی



شکل ۱۴. تصویر دو بعدی

### شاهد نظریه تداخل

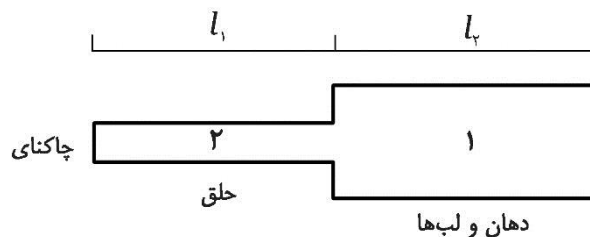
شیبا (۱۹۴۱) بر اساس نظریه تداخل اظهار داشته است هنگامی که در یک لوله گرفتگی ایجاد شود، مبنی بر این که این گرفتگی نزدیک به سرعت بیشینه باشد یا فشار بیشینه، فرکانس متغیر خواهد بود. بدین معنا که گرفتگی مجرای گفتار در نزدیکی جایی که سرعت بیشینه است، فرکانس سازه را کاهش داده و در جایی که فشار بیشینه است، سبب افزایش فرکانس سازه خواهد داشت (گونار فانت، ۱۹۶۰: ۸۶).

جانسون (۲۰۰۶: ۱۱۰) با در نظر داشتن این نظریه، ارتباط میان گرفتگی و بالا بودن میزان  $F_1$  در واکه [a] را این گونه بیان می‌کند که ایجاد گرفتگی در حلق با پایین آمدن و نزدیک شدن آن به جایی که فشار ماکزیمم (چاکنای) است، اتفاق می‌افتد.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تمام طول مجرای گفتار (در حفره پسین) به طور یکنواخت دچار گرفتگی نمی‌شود.

### شاهد مدل لوله‌ای

طبق بررسی‌های فانن (۱۹۶۰: ۶۶) و جانسون (۲۰۰۶: ۱۰۲-۱۰۳) طول مجرای گفتار هنگام تولید واکه [a] در حدود ۱۶cm و شکل مجرای گفتار مطابق شکل شماره ۱۵ بیان شده است:



شکل ۱۵. طول مجرای گفتار در مدل لوله‌ای

فانن (۱۹۶۰: ۶۶) همچنین بر اساس نظریه مدل لوله‌ای محاسبه طول مجرای گفتار را با در نظر داشتن شکل لوله‌ها به صورت دو لوله یک سر بسته و یک سر باز، از طریق رابطه ۳ قابل محاسبه دانسته است.

$$l_1 = \frac{(2n-1)c}{4F_1} \quad (\text{رابطه ۳})$$

باتوجه به مقادیر به دست آمده از بررسی سپنتا (۱۳۷۷)  $F_2 = 1100 \text{ Hz}$  و  $F_3 = 680 \text{ Hz}$  می‌باشد که در نتیجه طول مجرا با استفاده از فرمول بالا به شرح زیر قابل محاسبه است:

$$l_2 = \frac{c}{4F_2} \quad l_1 = \frac{35000}{4 \times 680} \cong 13 \text{ cm}$$

$$l_2 = \frac{c}{4F_3} \quad l_2 = \frac{35000}{4 \times 1100} \cong 8 \text{ cm}$$

$$l = l_1 + l_2 \quad 13 + 8 = 21 \text{ cm}$$

طول مجرای گفتار به دست آمده توسط آزمون مدل لوله‌ای ۲۱ سانتی‌متر است که با بررسی‌های فانن (۱۹۶۰: ۶۶) و جانسون (۲۰۰۶: ۱۰۲-۱۰۳) مغایرت دارد. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود برای به دست آوردن طول مجرا، با استفاده از پارامترهای  $F_1$  و  $F_2$  رابطه دیگری نیاز است.



## نتیجه‌گیری

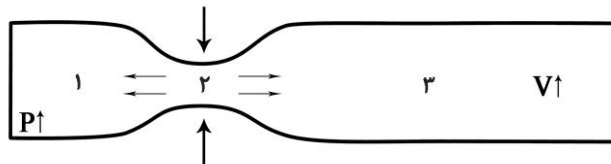
## سازگاری با نظریه تداخل

باتوجه به تصویر شکل ۱۲ آزمون سی‌تی‌اسکن و شکل بازسازی شده آن در زیر، (شکل ۱۶) به‌نظر می‌رسد که هنگام تولید واکه [a] زبان به دیواره حلق نزدیک شده و در مجاورت چاکنای گرفتگی ایجاد می‌شود. در اثر این گرفتگی، هوای موجود در این منطقه (منطقه ۲) با حرکتی پیستونی به درون و بیرون از ناحیه گرفته شده نوسان می‌کند. به دنبال آن فشار در منطقه ۱ افزایش می‌یابد. از طرفی، بر اساس قانون بویل<sup>۱</sup> (فرانک، ج. ۱؛ ترجمه محمد خرمی، ۱۳۷۴: ۴۱۴) نخست جریان هوا همیشه از منطقه پر فشار به منطقه کم فشار است. و دیگر آنکه بین فشار و حجم در دمای ثابت رابطه زیر برقرار است:

$$PV = \text{مقدار ثابت} \quad (\text{رابطه ۴})$$

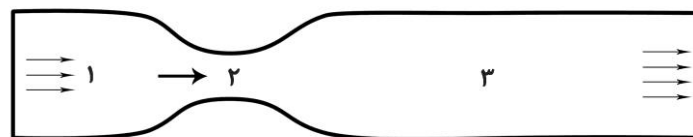
بنابراین، در شکل ۱۶ خواهیم داشت:

$$P_1V_1 = P_2V_2 = P_3V_3$$



شکل ۱۶. رابطه بین گرفتگی، فشار و حجم

با افزایش فشار در منطقه ۱ مقدار  $P_1V_1$  بیشتر شده و در نتیجه  $P_2V_2$  نیز افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در شکل ۱۷ ملاحظه می‌شود، با توجه به بالا بودن حجم  $V_3$  نسبت به  $V_1$ ، مقدار  $P_3$  کاهش می‌یابد. بنابراین، با کم شدن فشار در منطقه ۳ (نزدیک لب‌ها) و به دنبال آن افزایش سرعت و حجم در این ناحیه، انرژی جنبشی افزایش یافته و ذرات هوا با شدت بیشتری از حفره دهان خارج می‌شوند.

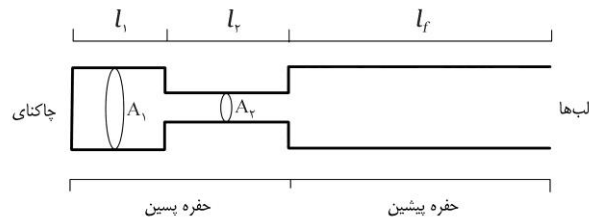


شکل ۱۷. رابطه بین گرفتگی، فشار و انرژی

به نظر می‌رسد یافته‌های به‌دست آمده از دو شکل ۱۶ و ۱۷ با نظریه تداخل نیز سازگار است.

سازگاری با بازخوان هلمهولتز<sup>۱</sup>

با توجه به مجموعه شواهد گفته شده می‌توان شکل ۱۸ را برای بازسازی مجرای گفتار هنگام تولید واکه [a] در زبان فارسی پیشنهاد کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، گرفتگی، مجرای گفتار را به دو حفره مستقل تقسیم کرده است.



شکل ۱۸. شکل مجرای گفتار واکه [a] در پژوهش حاضر

هنگامی که گرفتگی زبان در مجرای گفتار، حفره پیشین را از حفره پسین جدا می‌کند سبب پیدایش شکل بازخوان هلمهولتز می‌شود که در آن صورت  $F_1$  در حفره پسین و  $F_2$  در حفره پیشین پدید می‌آید (گونار فانت، ۱۹۶۰: ۲۰) از طرفی با توجه به داده‌های جدول شماره ۱ (بر اساس تصویر سی‌تی‌اسکن از آزمودنی‌ها) و رابطه هلمهولتز، فرکانس سازه اول واکه [a] به شرح زیر بازسازی می‌شود:

$$(رابطه ۵) \quad F_1 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1}{A_2 l_1 l_2}}$$

بنابراین، محاسبه  $F_1$  واکه مورد نظر برای هر یک از آزمودنی‌ها به شرح زیر می‌باشد:

$$F_1 = \frac{35000}{2 \times 3/14} \sqrt{\frac{0/27}{1/9 \times 3/1 \times 3/6}} \quad \text{شرکت کننده (الف)}$$

$$F_1 = 5573 \times 0/113 = 630 \text{ (Hz)} \quad F_1 = 630 \text{ Hz}$$

$$F_1 = \frac{35000}{2 \times 3/14} \sqrt{\frac{0/29}{1/8 \times 3/4 \times 3/5}} \quad \text{شرکت کننده (ب)}$$

$$F_1 = 5573 \times 0/116 = 646 \text{ (Hz)} \quad F_1 = 646 \text{ Hz}$$

۱. Helmholtz resonator (وقتی که لوله باریک به یک سر لوله‌ای بزرگ که انتهای آن بسته است متصل شود، ساختاری به نام بازخوان هلمهولتز را تشکیل می‌دهد).

$$F_1 = \frac{35000}{2 \times 3/14} \sqrt{\frac{0/31}{2 \times 3/3 \times 3/6}} \quad \text{شرکت کننده (پ)}$$

$$F_1 = 5573 \times 0/114 = 635 \text{ (Hz)} \quad F_1 = 635 \text{ Hz}$$

با توجه به مقادیر به‌دست آمده از  $F_1$  شرکت کننده‌های پژوهش حاضر، نتیجه می‌شود که برای محاسبه  $F_1$  واکه [a] در فارسی می‌توان از رابطه هلمهولتز (رابطه ۵) در بازسازی آن استفاده کرد. همچنین مقدار به دست آمده در همهٔ آزمودنی‌ها در بازهٔ قابل قبولی از تعریف فرکانس این سازه قرار دارد. از آنجایی که حفرهٔ پیشین به‌طور مستقل تشکیل یک لوله یک سر بسته و یک سر باز را می‌دهد، فرکانس سازهٔ  $F_2$  طبق رابطه زیر بازسازی می‌شود:

$$F_2 = \frac{c}{4l_f} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

بنابراین، طبق داده‌های جدول شمارهٔ ۱، فرکانس سازهٔ دوم واکه [a] برای هر یک از آزمودنی‌ها به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$F_2 = \frac{35000}{4 \times 1/8} = 994 \text{ Hz} \quad \text{شرکت کننده (الف)}$$

$$F_2 = \frac{35000}{4 \times 1/7} = 1006 \text{ Hz} \quad \text{شرکت کننده (ب)}$$

$$F_2 = \frac{35000}{4 \times 1/7} = 1006 \text{ Hz} \quad \text{شرکت کننده (پ)}$$

مجموع یافته‌ها را می‌توان به این صورت جمع‌بندی کرد که  $F_1$  به‌دست آمده از رابطهٔ هلمهولتز با آنچه که از فرکانس سازهٔ اول واکه [a] در زبان فارسی ارائه شده است، انطباق دارد. بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از بازخوان هلمهولتز در مقایسه با مدل لوله‌ای، روشی مناسب در بازسازی شکل مجرای گفتار هنگام تولید واکه [a] در زبان فارسی است.

## منابع

- بلت، فرانک. جی (۱۳۷۴)، فیزیک پایه جلد دوم سیالت، حرارت و امواج، ترجمه محمد خرمی، تهران: انتشارات فاطمی، چاپ اول.
- بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۶۹)، تجزیه و تحلیل صوتی واکه‌های ساده و مرکب زبان فارسی بر اساس نظریه آواشناسی فانت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران: دانشگاه تهران.
- بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۷۴)، بازنمایی واجی و آوایی زبان فارسی و کاربرد آن در بازشناسی گفتار، رساله دکتری، تهران: دانشگاه تهران.

- بی‌جن‌خان، محمود (۱۳۹۲)، نظام آوایی زبان فارسی، تهران: سمت.
- ثمره، یداله (۱۳۸۶)، آواشناسی زبان فارسی - آواها و ساخت آوایی هجا، ویراست دوم، تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- سپنتا، ساسان (۱۳۷۷)، آواشناسی فیزیکی زبان فارسی (توصیف مشخصه‌های صوت‌شناختی واج‌های زبان فارسی)، اصفهان: نشر گلها.
- مدرسی قوامی، گلناز (۱۳۹۰)، آواشناسی: بررسی علمی گفتار، تهران: سمت.
- Fant, G. (1960), Acoustic theory of speech production, Paris: Mouton, Second printing.
- Jazayeri, M. H, Paper. (1961), A reference grammar of modern Persian, Under contact with: United States Office of Education Language Development Section.
- Johnson, K. (2003), Acoustic and auditory phonetics, Second Edition, Oxford: Blackwell.