

Το Bernulli effect και η μυοελαστικότητα στη δόνηση των χορδών

Ο ρόλος της αεροδυναμικής,
και της βιοελαστικότητας στη φώνηση



Λοιπόν αφού δεν θέλεις να υπακούσεις στο νόμο μου καταδικάζωσαι να δονήσεις τις χορδές σου 1047 φορές το δευτερόλεπτο, χωρίς καμιά...βοήθεια!!!

Μια προσωπική ιστορία: Στα μέσα της δεκαετίας του '80 ένα μικρό φωνητικό πρόβλημα με οδήγησε στην πόρτα ενός πολύ καλού ωτορινολαρυγγολόγου/φωνιάτρου, γεμάτη φόβο για τη υγεία της φωνής μου αλλά και ελπίδες για να μάθω κάποια επιπλέον πράγματα για τη χρήση της φωνής, από έναν επιστήμονα του είδους. «Όλα καλά», μου είπε «άψογες γερές χορδές» και το μικρό πρόβλημα αποδείχθηκε πολύ...μικρό.

*«Απαιτείται πολύ μελέτη, αν θέλει κανείς να γίνει καλός τραγουδιστής. Για να έχεις μια ευκίνητη φωνή και με μεγάλη έκταση χρειάζεται πολλή και σωστή μυϊκή εξάσκηση των χορδών». Δουλειά, δουλειά, δουλειά! Αχ, τίποτα ωραίο σ' αυτή τη ζωή δε μας χαρίζεται χωρίς κόπο! «Καταλαβαίνεις» μου συμπλήρωσε, « ότι για να παράγεις αυτές τις ψηλές νότες πρέπει οι χορδές να δονηθούν πάνω από χίλιες φορές το δευτερόλεπτο». Έφυγα χαρούμενη μεν, γιατί πήρα τη γνωμάτευση ότι ήμουν κάτοχος ενός υγιούς φωνητικού συστήματος, αλλά μάλλον ...παραπληροφορημένη. Ο γιατρός, δεν μου διευκρίνησε (δεν ήταν αυτή η δουλειά του άλλοστε, το να μου εξηγήσει τη διαδικασία λειτουργίας του φωνητικού μηχανισμού) αν οι μύες των φωνητικών μου χορδών είναι ή πρέπει να είναι τόσο υπεράνθρωπα εργατικοί ώστε να ανοιγοκλείσουν τις χορδές μου π.χ. χίλιες πεντακόσιες φορές κάθε δευτερόλεπτο.(Ο κακόμοιρος εγκέφαλός μου, επίσης θα πρέπει να κουράζεται πάρα πολύ για να στέλνει τόσες εντολές ανοιγοκλεισίματος. Κάπως σαν τον ...Spreedy Gongales). Πρόσεχα λοιπόν το λαιμό μου σαν τα μάτια μου (ή, μάλλον πολύ πιό πολύ), μην κρυσώσει, μη βήξει, μην κουραστεί, μη μιλήσει πολύ, μην...απεργήσει και δε θέλει να μου δίνει τα χίλια τόσα ανοιγοκλεισίματα το δευτερόλεπτο. Εξακολουθούσα να το πιστεύω για αρκετά χρόνια, μέχρις ότου μια σπουδαία καθηγήτρια φωνής στην Αμερική μου μίλησε για την **αεροδυναμική** και τη **βιοελαστικότητα** και τους νόμους που διέπουν τη φώνηση, που τους ...υπακούμε θέλοντας και μη.*

Η δόνηση των φωνητικών χορδών διέπεται από το συνδυασμό των νόμων της **εμβιομηχανικής (βιοελαστικότητα)** αλλά και της **αεροδυναμικής (Bernulli effect)**.

Το 1886 ο G.Stoker διατύπωσε τη θεωρία ότι οι χορδές λειτουργούν όπως κάθε έγχορδο όργανο και στη συνέχεια το 1892 ο

$$n = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

R.H. Woods παρουσίασε το νόμο/εξίσωση της λειτουργίας τους, βασιζόμενος στη θεωρία του Stoker. Οι θεωρίες τους αποδείχτηκαν ελλιπείς και το σίγουρο είναι ότι οι φωνητικές

πτυχές δεν λειτουργούν όπως οι χορδές των έγχορδων οργάνων.

Το 1956, ο A. Sonninen, διατύπωσε ένα νέο νόμο/εξίσωση: η παραγωγή συχνότητας [f] από τη δόνηση των φωνητικών χορδών

ισούται με μια σταθερά C επί ένα κλάσμα με αριθμητή το άθροισμα K [$K=K^1+K^2$] της εσωτερικής παθητικής έντασης της φωνητικής πτυχής K^1 , που σχετίζεται με τη βιοελαστικότητα τους, συν την εσωτερική

$$f = C \frac{K}{M}$$

ενεργητική ένταση, που σχετίζεται με την μυϊκή δράση και αλλαγές της φωνητικής πτυχής K^2 και παρονομαστή τη μάζα της φωνητικής πτυχής [M]. Παρόλο που και αυτή η διατύπωση είναι ελλιπής, μας υπενθυμίζει μια σημαντική πραγματικότητα. Οι φωνητικές χορδές ξεκινούν το πλησίασμά τους η μια στην άλλη (ή κλείνουν) πριν το ρεύμα του αέρα τις θέσει σε δόνηση.

Το 1966, ο J. Van Den Berg διατύπωσε την μέχρι σήμερα, κοινά αποδεκτή θεωρία του μηχανισμού της φώνησης :

τη μουελαστική-αεροδυναμική θεωρία.

Πως παρεμβαίνει στο μηχανισμό της φώνησης η αεροδυναμική; Το 18^ο αιώνα, ο ελβετικής καταγωγής Daniel Bernulli (1700-1782), μέλος μιας οικογένειας κατά παράδοση επιστημόνων και μαθηματικών διατύπωσε μεταξύ άλλων και τον περίφημο **νόμο της αεροδυναμικής**. Ο Bernulli ανακάλυψε ότι όσο η ταχύτητα ενός

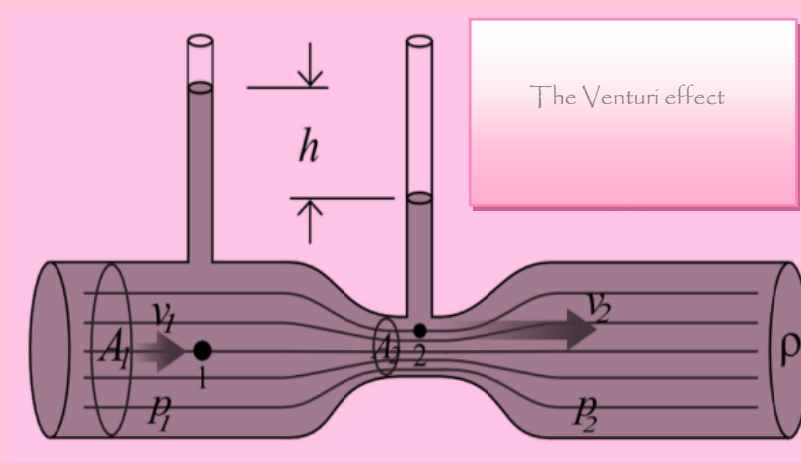
υγρού ή του αέρα ανεβαίνει, η πίεση κατεβαίνει.

$$d \times \frac{1}{2}(v^2 p) = c$$

d = πυκνότητα v = ταχύτητα

p = πίεση c = μία σταθερά

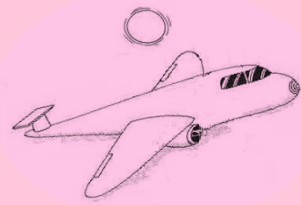
Μπορούμε να το αποδείξουμε βασιζόμενοι στο πείραμα με τον



σωλήνα, του ιταλού φυσικού Giovanni Battista Venturi (1746-1822). Σταθερό υγρό ή αέρας περνάει μέσα από ένα σωλήνα και ένα τμήμα του

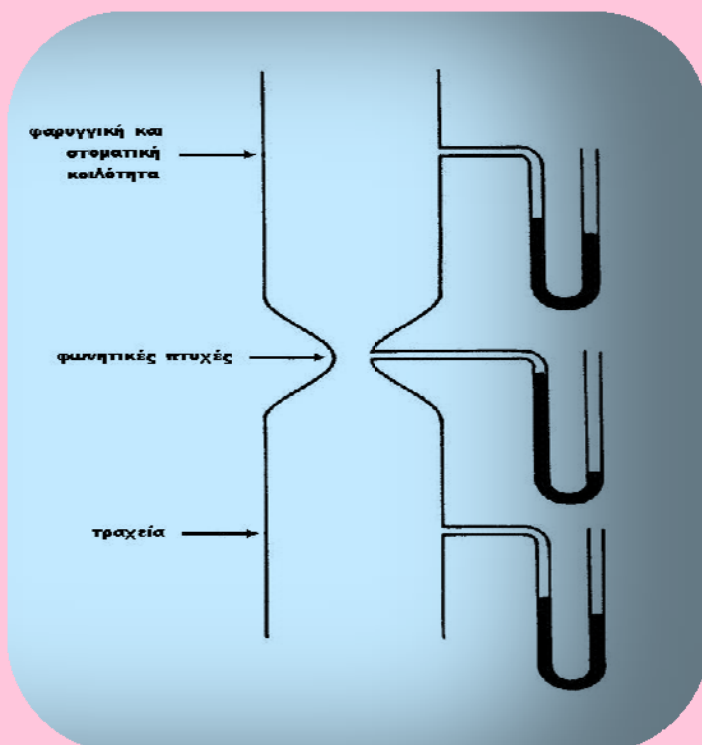
σωλήνα το σφίγγουμε (συμπιέζουμε). Στο συμπιεσμένο σημείο, η ροή του υγρού (ή του αέρα) θα επιταχυνθεί και θα επέλθει πτώση της πίεσης στα τοιχώματα του σωλήνα. Στο σημείο λοιπόν, που ο σωλήνας συμπιέζεται αναπτύσσεται περισσότερη ενέργεια, όσο τα μόρια του υγρού ή του αέρα επιταχύνουν, αφήνοντας λιγότερη ενέργεια να ασκήσει πίεση και η πίεση πέφτει.

Το φαινόμενο που ανακάλυψε ο Bernulli εξηγεί γιατί τα αεροπλάνα πετάνε, (αφού η πτώση πίεσης τα ...σηκώνει στον αέρα. Το σχήμα των φτερών



τους βοηθάει στην μεγαλύτερη επιτάχυνση του αέρα από πάνω τους, ενώ από κάτω η ταχύτητα ροής του αέρα είναι πιο αργή, άρα η πίεση είναι αυξημένη). Μας εξηγεί επίσης γιατί ο αέρας τραβιέται έξω (μαζί με ότι χαρτάκια ή ελαφρά αντικείμενα μεταφέρουμε)

από τα παράθυρα του αυτοκινήτου, αλλά και γιατί η κουρτίνα στο μπάνιο κολλάει πάνω μας, την ώρα που πλενόμαστε και κυλάει στο σώμα μας το νερό. Επίσης ένα καλό και εύκολο παράδειγμα αύξησης ταχύτητας της ροής, είναι όταν με το αντίχειρά μας στενέψουμε την άκρη ενός λάστιχου ποτίσματος ή χρησιμοποιήσουμε μηχανικό εξάρτημα που μπαίνει στην άκρη του λάστιχου, (ή ρυθμιζόμενη βρύση του ντους) κάνει ακριβώς το ίδιο. Το νερό πετάγεται με ορμή μακρύτερα.



Σχηματική παράσταση του Bernulli effect στη γλωττίδα.

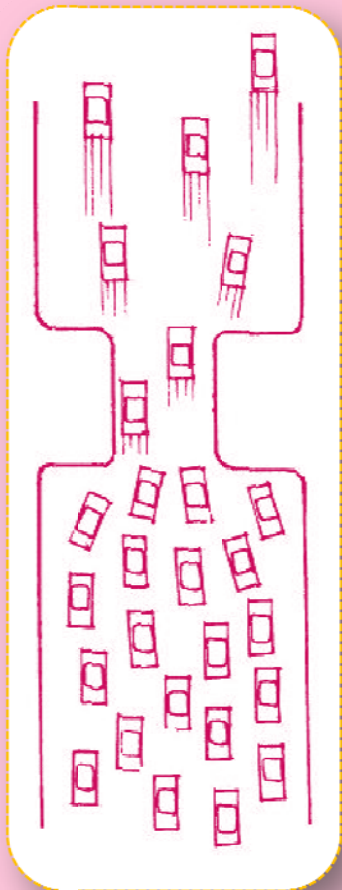
Με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα στο σημείο που οι χορδές πλησιάζονται, η πίεση χαμηλώνει (αρνητική πίεση αναπτύσσεται)

*Και ποιά
είναι η
πρακτική
επίδραση
αυτών των
φαινομένων
στην
παραγωγή
της φωνής
μας;*

(Είναι μια εύλογη ερώτηση γιατί ο σπουδαστής φωνής ενδιαφέρεται για το πως λειτουργεί η φωνή του και όχι για μαθήματα...φυσικής) Για να καταλάβουμε την επίδραση*¹ του νόμου όσο αφορά την παραγωγή φωνής, διατυπώνουμε απλά την επίδραση στις φωνητικές χορδές. Το Bernulli effect παρέχει μια εξήγηση του πως δονούνται οι φωνητικές πτυχές. Βασικά είναι κατασκευασμένες από το κυρίως «σώμα» στο βάθος και την «επικάλυψη» στο εξωτερικό μέρος. Εκτός από το τμήμα του θυρεοαρυταινοειδή (έσω θυρεοαρυταινοειδής =vocalis) αποτελείται από επιστρώσεις μαλακών ιστών. Κάθε επίστρωση έχει διαφορετικές ιδιότητες, μπορούμε να τις παρομοιάσουμε με στρώματα διαφορετικών υλικών που συνδέονται με ελατήρια και που κάθε υλικό έχει ανεξάρτητη κίνηση και τον ιδιαίτερό του βαθμό ελαστικότητας, που αυξάνει όσο πηγαίνουμε προς τις άκρες. Όταν ξεκινάμε την παραγωγή φώνησης οι φωνητικές πτυχές πλησιάζονται και όταν αποκτήσουν επαφή προσωρινά, το εκπνεόμενο ρεύμα αέρα που ανεβαίνει από την τραχεία διακόπτεται στιγμιαία. Κάτω από τις φωνητικές χορδές ξεκινά η αύξηση υπογλωττιδικής πίεσης. Κάποια στιγμή η πίεση έχει αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε οι φωνητικές πτυχές διαχωρίζονται βίαια, ελευθερώνοντας τη ροή του αέρα, διαμέσου των φωνητικών πτυχών προς το φάρυγγα. Η επιτάχυνση του αέρα όμως ρίχνει την πίεση στο σημείο των φωνητικών πτυχών και τις ξανακολλά μαζί. Ξαναδημιουργείται υπογλωττιδική πίεση και η διαδικασία των χορδών που «κολλούν και αποχωρίζονται», επαναλαμβάνεται κυκλικά. Έτσι ξεκινάει η παραγωγή του ήχου.

Αν σκεφτούμε ότι μια σοπράνο για να παράγει ένα ψηλό ντο πρέπει να δονήσει τις χορδές της 1047 φορές το δευτερόλεπτο, θα ήταν αφελές να πιστέψουμε ότι αυτό γίνεται με επαναλαμβανόμενες μυϊκές συστολές. Είναι φανερό ότι **ακούσιοι φυσικοί μηχανισμοί καλούνται να συνδράμουν τις εκούσιες εντολές του εγκεφάλου μας για την φώνηση, αλλά και: Η δόνηση των φωνητικών πτυχών δεν είναι αυτοενεργοποιούμενη** (W. Vennard, 1967).

(*¹ παρά τις θεωρίες των I. Hiroto (1966), K. Isshizaka και M. Matsudaira (1972) ότι η επίδραση του Bernulli effect στο φωνητικό μηχανισμό έχει υπερεκτιμηθεί)



Αριστερά, είναι μια πασίγνωστη και πολυχρησιμοποιημένη σχηματική παράσταση, που αναπαριστά την αρχή του Bernulli (Bernulli's principle)/ή το Venturi effect, για την καλύτερη κατανόηση, από όσους δεν έχουν και τις ...καλύτερες σχέσεις με την επιστήμη της φυσικής. Αντικαθιστούμε την οδό του αέρα (τραχεία-λάρυγγας-φάρυγγας) με μία λεωφόρο ταχείας κυκλοφορίας, που στενεύει πολύ σε ένα μικρό τμήμα της. Αντικαθιστούμε επίσης τα μόρια του αέρα με αυτοκίνητα που τρέχουν μέσα σ' αυτή τη λεωφόρο. Τα αυτοκίνητα (βλ. μόρια) είναι πολύ κοντά, πριν το στένεμα της λεωφόρου παρουσιάζοντας πυκνή κυκλοφορία (βλ. ψηλή πίεση). Όσο πιο κοντά βρίσκονται τόσο πιο αργά κινούνται (αυτό θα συνέβαινε και σε μια πραγματική λεωφόρο, για να μην τρακάρουν). Αντιθέτως όσο πιο γρήγορα κινηθούν τόσο πιο μεγάλο χώρο χρειάζονται (βλ. αραιά μόρια=χαμηλή πίεση).

Το φαινόμενο, που βασίζεται στην αρχή του Bernulli είναι επίσης και η κινητήριος δύναμη, για δύο από τις βασικότερες εισαγωγικές ασκήσεις της φωνητικής τέχνης την **τρίλλια των χειλιών** (lip trill) και την **τρίλλια της γλώσσας** (tongue trill). Η ενέργεια που μοιράζεται μεταξύ των γνήσιων φωνητικών χορδών και της γλώσσας ή των χειλιών, ελευθερώνει το λαιμό μας από περιττά βλαπτικά σφιξίματα και αφήνει να παραχθεί πολύ μεγάλος αριθμός δονήσεων δηλαδή πολύ ψηλές νότες, ψηλότερες από αυτές που μπορούμε να παράγουμε με συμβατικές φωνητικές ασκήσεις.

Η αεροδυναμική και η βιοελαστικότητα λοιπόν είναι υπεύθυνες για τη δόνηση των χορδών μας και την παραγωγή του πρωτογενούς «ήχου», που και με τη συμβολή της ακουστικής (διαμόρφωση του ήχου), θα γίνουν αυτό που ονομάζουμε «φωνή».