

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων & Διατροφής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ

Ενότητα 11^η: Βενζόλιο & η έννοια της αρωματικότητας

Δημήτρης Π. Μακρής *PhD DIC*

Αναπληρωτής Καθηγητής



© 2019 - 2020

1. Δομή βενζολίου

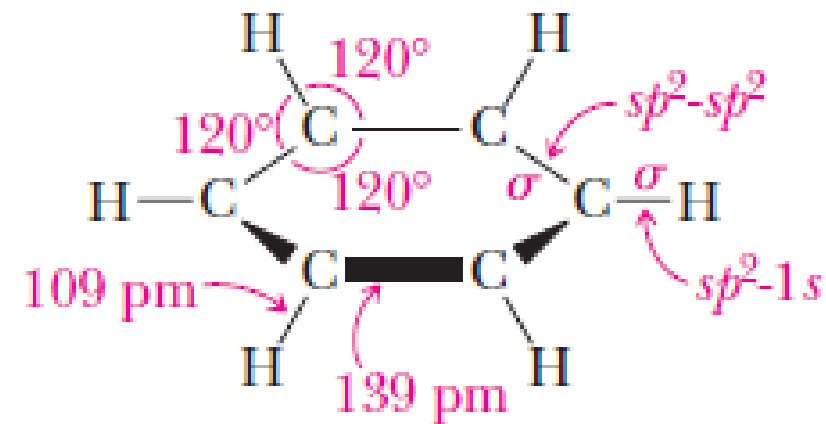
Το μοντέλο μοριακών τροχιακών

Ο όρος **αρένιο** (arene) χρησιμοποιείται για να περιγράψει αρωματικούς υδρογονάνθρακες, κατ' αναλογία με το αλκάνιο, αλκένιο και αλκίνιο. Το βενζόλιο είναι το μητρικό αρένιο. Όπως μια ομάδα που προκύπτει από την αφαίρεση ενός H από ένα αλκάνιο ονομάζεται αλκυλομάδα και συμβολίζεται με R-, μια ομάδα που προέρχεται από την αφαίρεση ενός H από ένα αρένιο ονομάζεται **αρυλομάδα** (aryl group) και συμβολίζεται με Ar-.

Ο ανθρακικός σκελετός του βενζολίου σχηματίζει ένα κανονικό εξάγωνο με C-C-C και H-C-C γωνίες δεσμών 120° . Γι' αυτόν τον τύπο δεσμών, ο άνθρακας χρησιμοποιεί sp^2 υβριδικά τροχιακά.

Κάθε άνθρακας σχηματίζει σ-δεσμούς με δύο γειτονικούς άνθρακες μέσω αλληλοεπικάλυψης των sp^2-sp^2 υβριδικών τροχιακών και έναν σ-δεσμό με το υδρογόνο μέσω αλληλοεπικάλυψης των sp^2-1s τροχιακών.

Όπως προσδιορίζεται πειραματικά, όλοι οι δεσμοί άνθρακα-άνθρακα έχουν μήκος 139 pm, μια μέση τιμή του μήκους ενός απλού δεσμού μεταξύ sp^3 υβριδισμένων ανθράκων (154 pm) και ενός διπλού δεσμού μεταξύ sp^2 υβριδισμένων ανθράκων (133 pm).

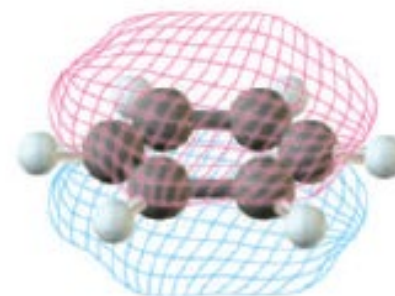
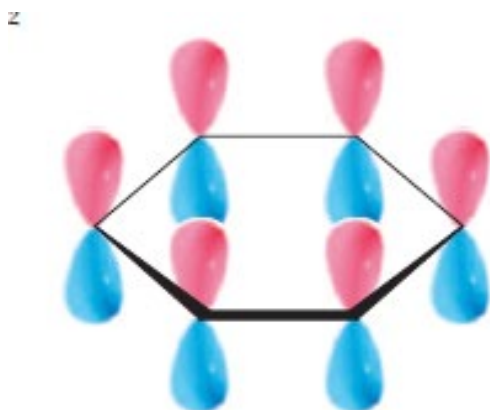


1. Δομή βενζολίου

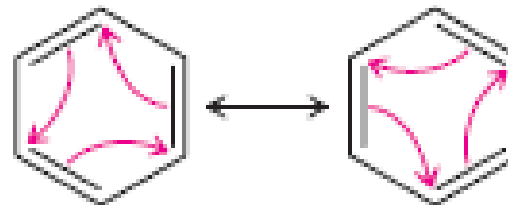
Το μοντέλο μοριακών τροχιακών

Κάθε άνθρακας έχει επίσης και ένα μη-υβριδοποιημένο $2p$ τροχιακό που είναι κάθετο στο επίπεδο του δακτυλίου και περιέχει ένα ηλεκτρόνιο. Σύμφωνα με την θεωρία των μοριακών τροχιακών, ο συνδυασμός αυτών των έξι παράλληλων $2p$ ατομικών τροχιακών δίνει σύνολο από έξι π μοριακά τροχιακά, τρία π -δεσμικά και τρία π -αντιδεσμικά.

Στην θεμελιώδη ηλεκτρονιακή αναπαράσταση του βενζολίου, τα έξι ηλεκτρόνια του π -συστήματος καταλαμβάνουν τα τρία δεσμικά μοριακά τροχιακά. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς των μοριακών τροχιακών, η μεγάλη σταθερότητα του βενζολίου είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι αυτά τα τρία δεσμικά μοριακά τροχιακά έχουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια εν συγκρίσει με τα έξι μη-συνδυασμένα $2p$ ατομικά τροχιακά.



1. Δομή βενζολίου



Το μοντέλο συντονισμού

Μια από τις υποθέσεις της θεωρίας συντονισμού είναι ότι όταν ένα μόριο ή ιόν μπορεί ν' αναπαρασταθεί από δύο ή περισσότερες συνεισφέρουσες δομές, καμιά από αυτές τις δομές δεν αναπαριστά το μόριο ή ιόν επαρκώς από μόνη της. Το βενζόλιο αναπαρίσταται ως υβρίδιο δύο ισοδύναμων συνεισφέρουσων δομών, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως δομές Kekulé.

Κάθε μία από τις δομές Kekulé έχει ίση συνεισφορά στο υβρίδιο. Έτσι, οι δεσμοί άνθρακα-άνθρακα δεν είναι ούτε διπλοί, ούτε απλοί, αλλά κάτι ενδιάμεσο.

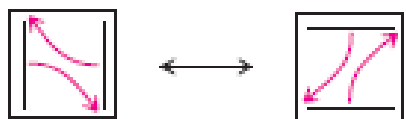
Αναγνωρίζεται ότι καμιά από αυτές τις συνεισφέρουσες δομές δεν υπάρχει (είναι μόνο εναλλακτικοί τρόποι ζεύξης των 2*p* τροχιακών χωρίς λόγω προτίμησης στην μία ή την άλλη) και ότι η πραγματική δομή είναι μια επίθεση αμφότερων.

Όμως, μια συνεισφέρουσα δομή χρησιμοποιείται συνήθως για την αναπαράσταση του μορίου, γιατί είναι ότι εγγύτερο στην πραγματική δομή.

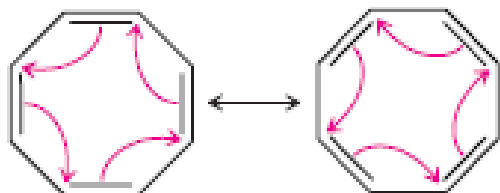
2. Η έννοια της αρωματικότητας

Σύμφωνα με την θεωρία συντονισμού, το βενζόλιο αναπαρίσταται καλύτερα ως υβρίδιο δύο ισοδύναμων συνεισφέρουσων δομών.

Κατ' αναλογία, το κυκλοβουταδιένιο και το κυκλοοκτατετραένιο μπορούν επίσης ν' αναπαρασταθούν ως υβρίδια δύο ισοδύναμων συνεισφέρουσων δομών.



Cyclobutadiene as a hybrid of two equivalent contributing structures



Cyclooctatetraene as a hybrid of two equivalent contributing structures

Οι ενώσεις αυτές όμως δεν είναι αρωματικές. Το κυκλοβουταδιένιο είναι πολύ ασταθές και δεν έχει καμιά χημική και φυσική ιδιότητα που να σχετίζεται με αρωματικές ενώσεις.

Το κυκλοοκτατετραένιο έχει χημικές ιδιότητες που είναι τυπικές των αλκενίων. Αντιδρά εύκολα με αλογόνα και υδραλογόνα, καθώς και με ήπιους οξειδωτικούς και αναγωγικούς παράγοντες.

Ποιες είναι λοιπόν οι θεμελιώδεις αρχές που αποτελούν τον αρωματικό χαρακτήρα? Με άλλα λόγια, ποια είναι τα δομικά χαρακτηριστικά των ακόρεστων ενώσεων που έχουν υψηλή ενέργεια συντονισμού και δεν υπόκεινται σε αντιδράσεις τυπικές των αλκενίων, αλλά αντιδράσεις υποκατάστασης?

2. Η έννοια της αρωματικότητας

Τα κριτήρια Hückel για αρωματικότητα

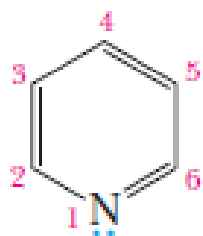
Τα κριτήρια Hückel για την αρωματικότητα συνοψίζονται παρακάτω. Μια ένωση για να είναι αρωματική, θα πρέπει:

1. Να είναι κυκλική.
2. Να έχει ένα $2p$ τροχιακό σε κάθε άτομο του δακτυλίου.
3. Να είναι επίπεδη ή σχεδόν επίπεδη, έτσι ώστε να υπάρχει συνεχής ή σχεδόν συνεχής αλληλοεπικάλυψη όλων των $2p$ τροχιακών του δακτυλίου.
4. Να έχει ένα κλειστό κύκλωμα $(4n + 2)$ ηλεκτρονίων στην κυκλική διευθέτηση των $2p$ τροχιακών (δηλαδή $n = 0$ ή οποιοσδήποτε ακέραιος αριθμός).

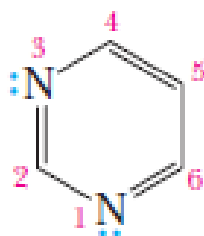
2. Η έννοια της αρωματικότητας

Ετεροκυκλικές αρωματικές ενώσεις

Ο αρωματικός χαρακτήρας δεν περιορίζεται στους υδρογονάνθρακες, αλλά απαντάται και σε **ετεροκυκλικές ενώσεις** (heterocyclic compounds). Η πυριδίνη και η πυριμιδίνη είναι ετεροκυκλικά ανάλογα του βενζολίου. Στην πυριδίνη, μια CH ομάδα αντικαθίσταται από ένα άζωτο, ενώ στην πυριμιδίνη από δύο.



Pyridine



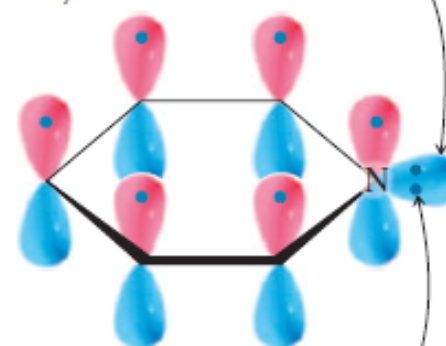
Pyrimidine

Καθένα από τα δύο μόρια πληροί τα κριτήρια αρωματικότητας Hückel. Το καθένα είναι μονοκυκλικό και επίπεδο, καθένα έχει ένα $2p$ τροχιακό σε κάθε άτομο του δακτυλίου και καθένα έχει έξι ηλεκτρόνια στο π -σύστημα.

Στην πυριδίνη, το άζωτο είναι υβριδισμένο σε sp^2 και το μονήρες ζεύγος ηλεκτρονίων κατέχει ένα sp^2 τροχιακό στο επίπεδο του δακτυλίου και είναι κάθετο στα $2p$ τροχιακά του π -συστήματος. Έτσι, το μονήρες αυτό ζεύγος δεν αποτελεί μέρος του π -συστήματος.

Στην πυριμιδίνη, κανένα μονήρες ζεύγος δεν ανήκει στο π -σύστημα.

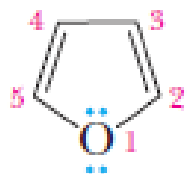
This sp^2 orbital is perpendicular to the six $2p$ orbitals of the π system



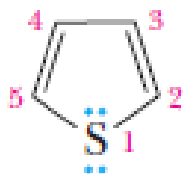
This electron pair is not part of the $(4n + 2)$ π electrons

2. Η έννοια της αρωματικότητας

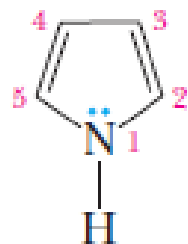
Οι ετεροκυκλικές ενώσεις με πενταμελή δακτύλιο φουράνιο, θειοφένιο, πυρρόλιο και ιμιδαζόλιο είναι επίσης αρωματικές.



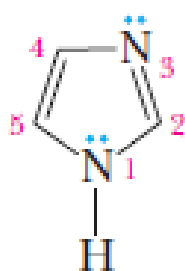
Furan



Thiophene



Pyrrole



Imidazole

Σ' αυτές τις επίπεδες ενώσεις, κάθε ετεροάτομο είναι υβριδισμένο σε sp^2 , και το μη-υβριδισμένο $2p$ τροχιακό είναι μέρος του κλειστού κυκλώματος των πέντε $2p$ τροχιακών.

Στο φουράνιο και το θειοφένιο, ένα μονήρες ζεύγος ηλεκτρονίων του ετεροατόμου βρίσκεται στο μη-υβριδισμένο $2p$ τροχιακό και είναι μέρος του π-συστήματος. Το άλλο μονήρες ζεύγος ηλεκτρονίων βρίσκεται σ' ένα sp^2 υβριδικό τροχιακό κάθετο στα $2p$ τροχιακά και δεν είναι μέρος του π-συστήματος.

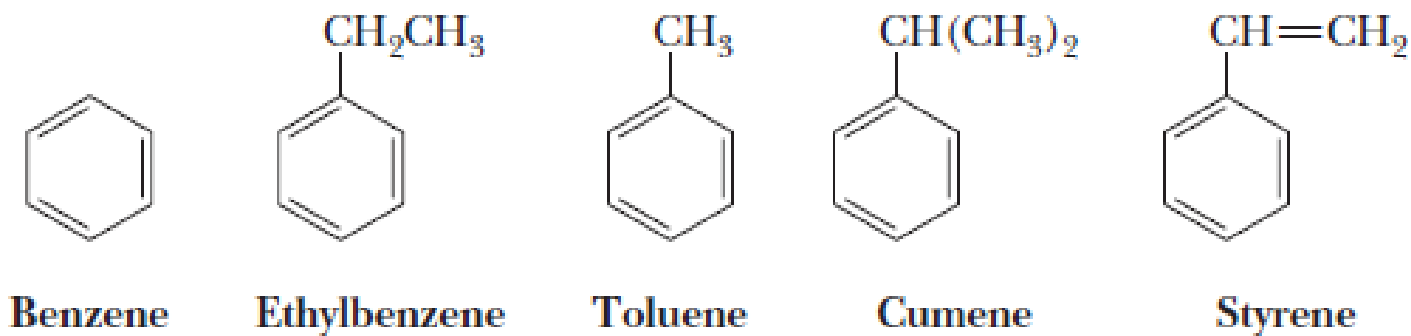
Στο πυρρόλιο, το μονήρες ζεύγος ηλεκτρονίων του αζώτου είναι μέρος του π-συστήματος. Στο ιμιδαζόλιο, το μονήρες ζεύγος του ενός αζώτου είναι μέρος της αρωματικής εξάδας, ενώ το άλλο όχι.

3. Ονοματολογία

Μονοϋποκατεστημένα βενζόλια

Τα μονοϋποκατεστημένα αλκυλβενζόλια ονομάζονται ως παράγωγα του βενζολίου, όπως π.χ. το αιθυλβενζόλιο. Το σύστημα IUPAC διατηρεί τα κοινά ονόματα για αρκετά από τα απλούστερα μονοϋποκατεστημένα αλκυλβενζόλια

Παραδείγματα είναι το τολουένιο (αντί μεθυλβενζόλιο), το κουμένιο (αντί ισοπροπυλβενζόλιο) και το στυρένιο (αντί βινυλβενζόλιο).



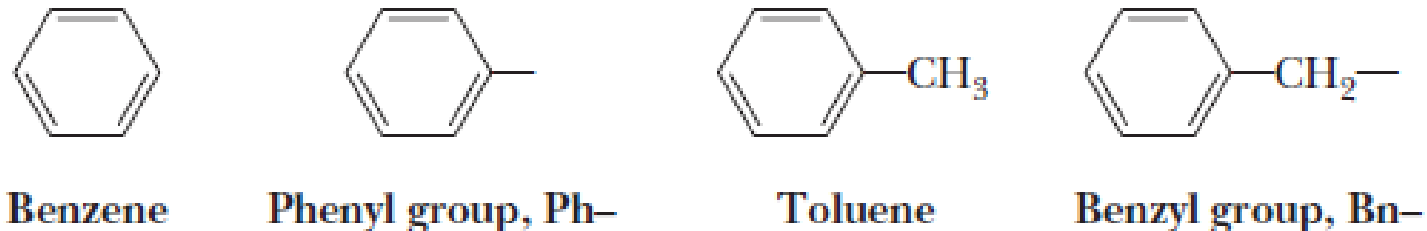
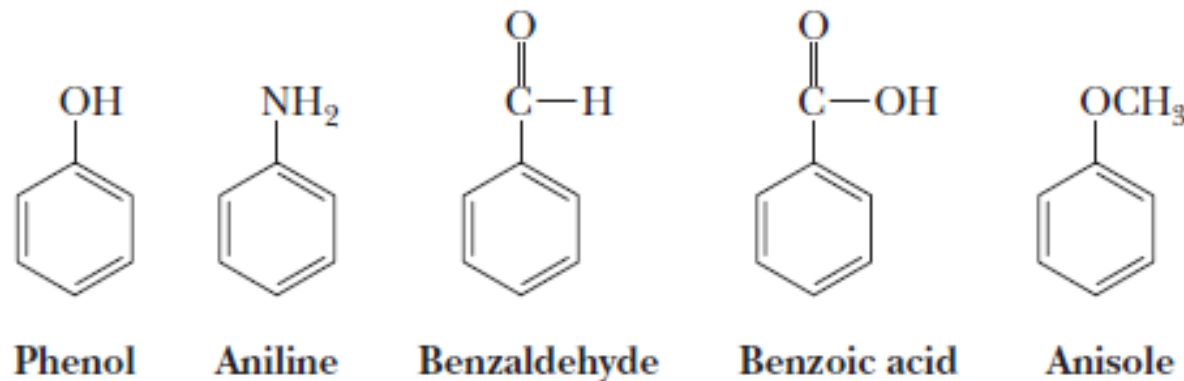
3. Ονοματολογία

Μονοϋποκατεστημένα βενζόλια

Τα κοινά ονόματα φαινόλη, ανιλίνη, βενζαλδεΐδη, βενζοϊκό οξύ και ανισόλη, επίσης διατηρούνται από το σύστημα IUPAC.

Όπως ήδη ειπώθηκε, η ομάδα που προέρχεται από των απώλεια ενός H από το βενζόλιο είναι μια **φαινυλομάδα**, με συντομογραφία Ph–.

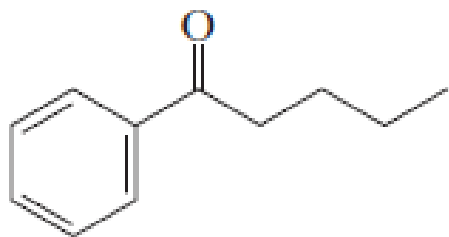
Κατ' αναλογία, η απώλεια ενός H από την μεθυλομάδα του τολουενίου είναι μια **βενζυλομάδα**, με συντομογραφία Bn–.



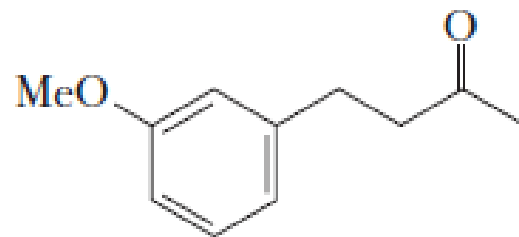
3. Ονοματολογία

Μονοϋποκατεστημένα βενζόλια

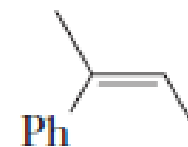
Στα μόρια που περιέχουν άλλες λειτουργικές ομάδες, η φαινυλομάδα και τα παράγωγά της ονομάζονται ως υποκαταστάτες.



1-Phenyl-1-pentanone



4-(3-Methoxyphenyl)-2-butanone



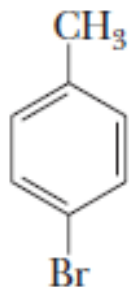
(Z)-2-Phenyl-2-butene

3. Ονοματολογία

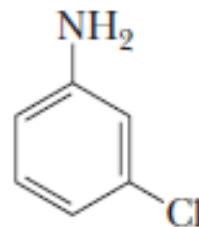
Διϋποκατεστημένα βενζόλια

Όταν υπάρχουν δύο υποκαταστάτες σ' έναν βενζολικό δακτύλιο, είναι πιθανά τρία συντακτικά ισομερή. Η θέση των υποκαταστατών μπορεί να υποδειχθεί με αρίθμηση των ατόμων του δακτυλίου, χρησιμοποιώντας τους δείκτες *ortho*, *meta*, και *para*, που υποδηλώνουν σχετικές θέσεις 1,2-, 1,3- και 1,4-, αντίστοιχα.

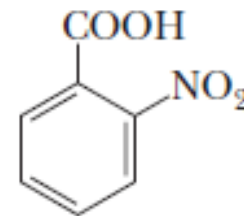
Όταν ο ένας από τους δύο υποκαταστάτες του δακτυλίου προσδίδει στην ένωση ένα ειδικό όνομα, (π.χ τολουένιο, κουμένιο κτλ.), τότε η ένωση ονομάζεται ως παράγωγο αυτού του μητρικού μορίου. Ο ειδικός αυτός υποκαταστάτης θεωρείται ότι βρίσκεται στον άνθρακα 1 του δακτυλίου. Το σύστημα IUPAC διατηρεί το όνομα ξυλένιο για τα τρία ισομερή διμεθυλβενζόλια.



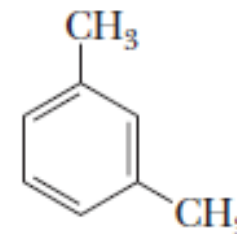
4-Bromotoluene
(*p*-Bromotoluene)



3-Chloroaniline
(*m*-Chloroaniline)



2-Nitrobenzoic acid
(*o*-Nitrobenzoic acid)



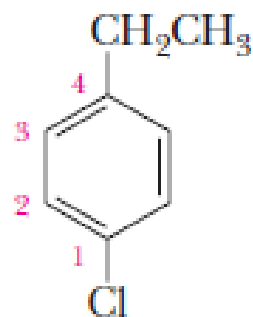
m-Xylene

3. Ονοματολογία

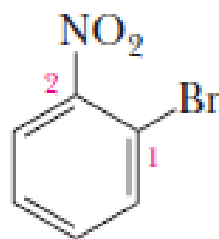
Διϋποκατεστημένα βενζόλια

Όταν καμιά ομάδα δεν προσδίδει κάποιο ειδικό όνομα, τότε η θέση τους δίνεται αριθμητικά και αναφέρονται αλφαβητικά, δίνοντας την κατάληξη -βενζόλιο.

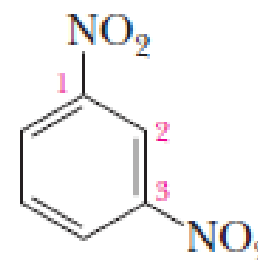
Ο άνθρακας του βενζολικού δακτυλίου που φέρει τον υποκαταστάτη ο οποίος αναφέρεται αλφαβητικά πρώτος, λαμβάνει τον αριθμό 1.



1-Chloro-4-ethylbenzene
(*p*-Chloroethylbenzene)



1-Bromo-2-nitrobenzene
(*o*-Bromonitrobenzene)



1,3-Dinitrobenzene
(*m*-Dinitrobenzene)

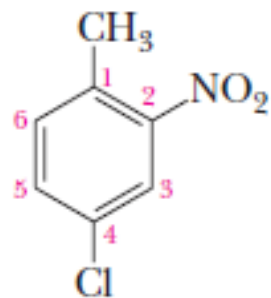
3. Ονοματολογία

Πολυϋποκατεστημένα βενζόλια

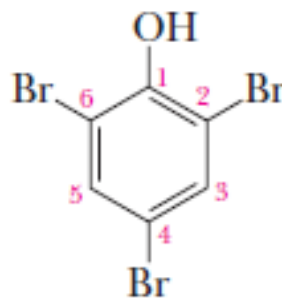
Όταν ο δακτύλιος φέρει τρεις ή περισσότερους υποκαταστάτες, η θέση τους υποδεικνύεται με αριθμούς. Αν κάποιος από τους υποκαταστάτες προσδίδει κάποιο ειδικό όνομα, τότε η ένωση ονομάζεται ως παράγωγο του μητρικού μορίου.

Αν κανένας από τους υποκαταστάτες δεν προσδίδει ειδικό όνομα, οι υποκαταστάτες αριθμούνται έτσι ώστε να δώσουν το χαμηλότερο σύνολο αριθμών και αναφέρονται αλφαβητικά πριν την κατάληξη *-βενζόλιο*.

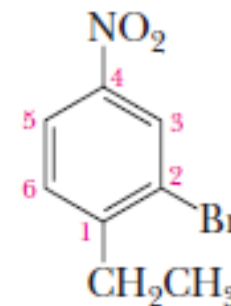
Στα παρακάτω παραδείγματα, η πρώτη ένωση είναι παράγωγο του τολουενίου και η δεύτερη της φαινόλης. Επειδή για την τρίτη δεν υπάρχει ειδικό όνομα, οι τρεις υποκαταστάτες της αναφέρονται αλφαβητικά και άτομα του δακτυλίου αριθμούνται χρησιμοποιώντας το χαμηλότερο δυνατό σύνολο αριθμών.



4-Chloro-2-nitrotoluene



2,4,6-Tribromophenol

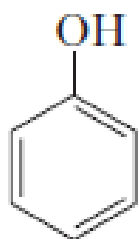


2-Bromo-1-ethyl-4-nitrobenzene

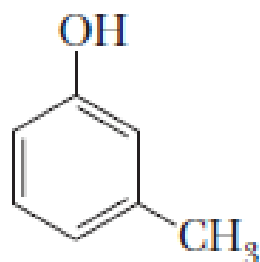
4. Φαινόλες

Δομή και ονοματολογία

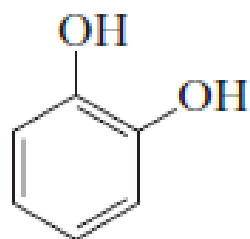
Η λειτουργική ομάδα της φαινόλης είναι μια υδροξυλομάδα ενωμένη απευθείας με τον βενζολικό δακτύλιο. Οι υποκατεστημένες φαινόλες ονομάζονται ως παράγωγα της φαινόλης, ως βενζενόλες ή με τα κοινά τους ονόματα.



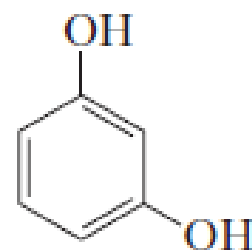
Phenol



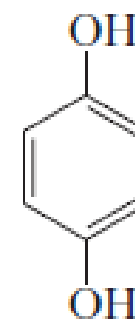
3-Methylphenol
(*m*-Cresol)



1,2-Benzenediol
(Catechol)



1,3-Benzenediol
(Resorcinol)

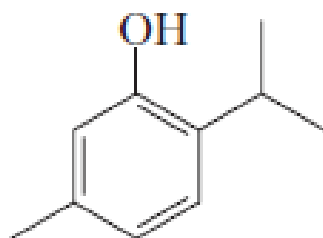


1,4-Benzenediol
(Hydroquinone)

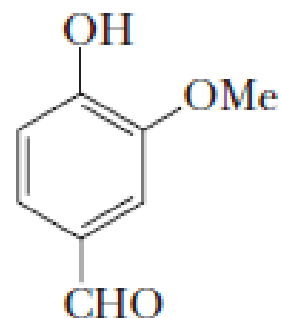
4. Φαινόλες

Δομή και ονοματολογία

Οι φαινόλες είναι ευρέως διαδεδομένες στην φύση. Η φαινόλη και οι ισομερείς κρεζόλες (*o*-, *m*-, και *p*-κρεζόλη) βρίσκονται στην πίσσα και στο πετρέλαιο. Η θυμόλη και η βανιλίνη είναι σημαντικά συστατικά του θυμαριού και της βανίλιας, αντίστοιχα.



2-Isopropyl-5-methylphenol
(Thymol)



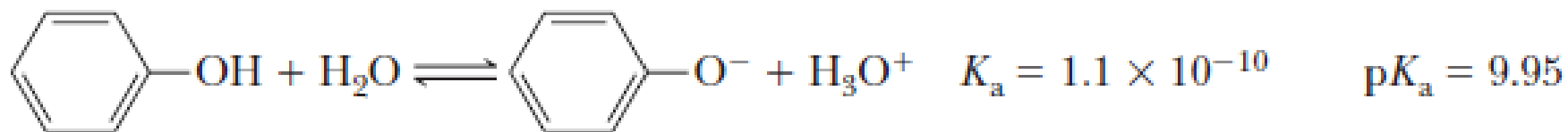
4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyde
(Vanillin)

4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

Αμφότερες οι φαινόλες και οι αλκοόλες φέρουν υδροξυλομάδα. Εντούτοις, οι φαινόλες ταξινομούνται ως διακριτή κατηγορία ουσιών, λόγω των χημικών τους ιδιοτήτων, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από αυτές των αλκοολών.

Μια από τις σημαντικότερες διαφορές είναι το γεγονός ότι οι φαινόλες είναι πολύ πιο όξινες από τις αλκοόλες. Η σταθερά ιονισμού της φαινόλης είναι 10^6 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της αιθανόλης.



4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

Σε υδατικό διάλυμα, οι αλκοόλες είναι ουδέτερες ουσίες και η συγκέντρωση του ιόντος υδρογόνου ενός διαλύματος αιθανόλης 0.1 M είναι η ίδια μ' αυτήν του καθαρού νερού.

Ένα διάλυμα φαινόλης 0.1 M είναι ελαφρώς όξινο και έχει pH 5.4.

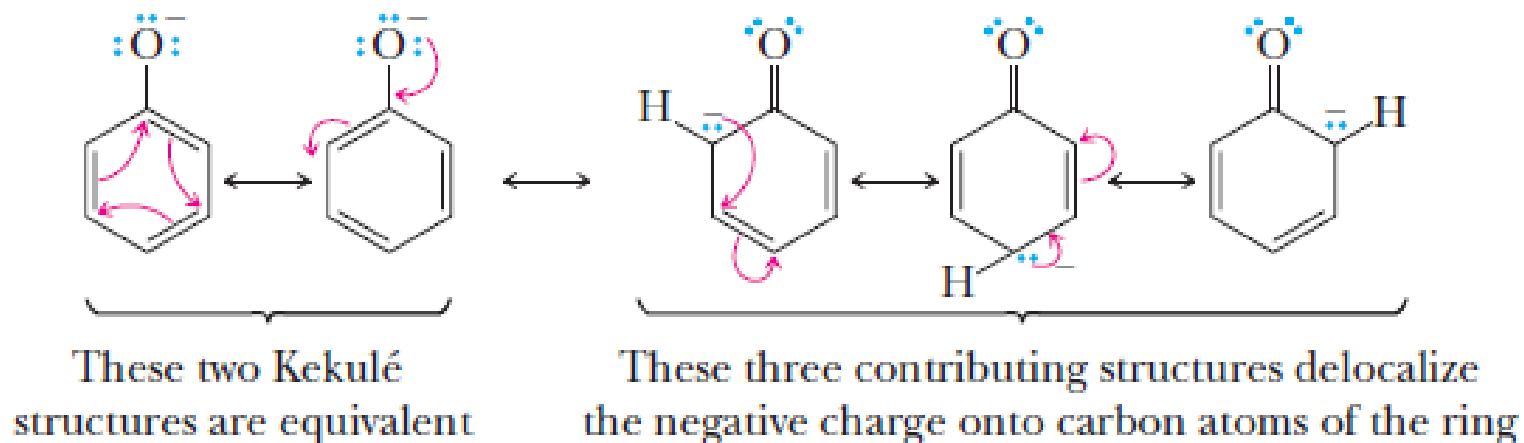
Relative Acidities of 0.1 M Solutions of Ethanol, Phenol, and HCl		
Acid Ionization Equation	$[H^+]$	pH
$CH_3CH_2OH + H_2O \rightleftharpoons CH_3CH_2O^- + H_3O^+$	1×10^{-7}	7.0
$C_6H_5OH + H_2O \rightleftharpoons C_6H_5O^- + H_3O^+$	3.3×10^{-6}	5.4
$HCl + H_2O \rightleftharpoons Cl^- + H_3O^+$	0.1	1.0

4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

Η μεγαλύτερη οξύτητα της φαινόλης είναι αποτέλεσμα της μεγαλύτερης σταθερότητας του ιόντος φαινοξειδίου εν συγκρίσει με το ιόν αλκοξειδίου. Το αρνητικό φορτίο στο ιόν φαινοξειδίου μετατοπίζεται μέσω συντονισμού. Οι δύο συνεισφέρουσες δομές στ' αριστερά τοποθετούν το αρνητικό φορτίο στο οξυγόνο.

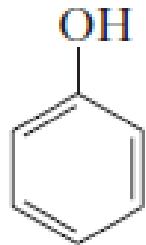
Οι τρεις συνεισφέρουσες δομές δεξιά τοποθετούν το αρνητικό φορτίο σε θέσεις *ορθο*- και *παρα*-, στο βενζολικό δακτύλιο. Λαμβάνοντάς τες όλες μαζί υπόψη, αυτές οι δομές μετατοπίζουν το αρνητικό φορτίο του ιόντος φαινοξειδίου πάνω σε τέσσερα άτομα. Σ' ένα ιόν αλκοξειδίου, δεν υπάρχει πιθανότητα μετατόπισης φορτίου.



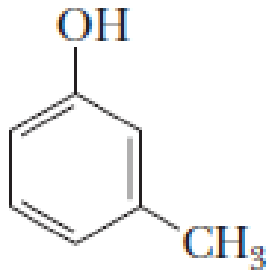
4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

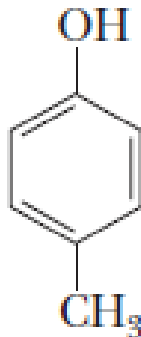
Οι υποκαταστάτες του δακτυλίου, ειδικά τα αλογόνα και οι νιτροομάδες, επηρεάζουν σημαντικά την οξύτητα των φαινολών μέσω ενός συνδυασμού επαγωγικού φαινομένου και συντονισμού. Αμφότερες οι *m*-κρεζόλη και *p*-κρεζόλη είναι ασθενέστερα οξέα απ' ότι η ίδια η φαινόλη, και η *m*-χλωροφαινόλη και η *p*-χλωροφαινόλη, ισχυρότερα.



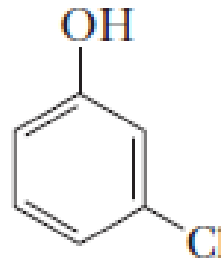
Phenol
 pK_a 9.95



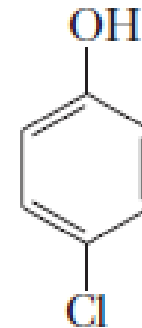
m-Cresol
 pK_a 10.01



p-Cresol
 pK_a 10.17



m-Chlorophenol
 pK_a 8.85



p-Chlorophenol
 pK_a 9.18

4. Φαινόλες

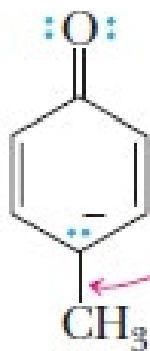
Οξύτητα των φαινολών

Το φαινόμενο εξασθένησης της οξύτητας των αλκυλ-υποκατεστημένων φαινολών μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Ο άνθρακας με υβριδισμό sp^2 ενός αρωματικού δακτυλίου είναι πιο ηλεκτραρνητικός απ' ό,τι ένα άτομο ενός αλκυλ-υποκαταστάτη με υβριδισμό sp^3 .

Οι αλκυλ-υποκαταστάτες είναι ομάδες που προσφέρουν ηλεκτρόνια στο αρωματικό δακτύλιο. Μ' αυτόν τον τρόπο, αποσταθεροποιούν τις δομές συντονισμού του ιόντος φαινοξειδίου κι έτσι μειώνεται η οξύτητα των φαινολών.

Το επαγωγικό φαινόμενο των αλογόνων είναι αντίθετο μ' αυτό των αλκυλ-υποκαταστατών.

Τα πολύ ηλεκτραρνητικά αλογόνα μειώνουν της ηλεκτρονιακή πυκνότητα του αρωματικού δακτυλίου και προσδίδουν μεγαλύτερη σταθερότητα στο ιόν αλογονοφαινοξειδίου, εν συγκρίσει με το ιόν φαινοξειδίου.



Polarization of this C—C bond by the electron-releasing inductive effect of the sp^3 carbon of the methyl group destabilizes this contributing structure

Το φθόριο που είναι το πιο ηλεκτραρνητικό, ενισχύει περισσότερο την οξύτητα των αλογονοφαινολών. Το βρώμιο έχει την μικρότερη επίδραση.

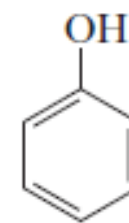
4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

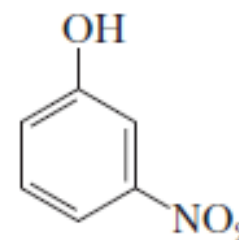
Αμφότερα το επαγωγικό φαινόμενο και ο συντονισμός παρατηρούνται στις νιτροφαινόλες. Σε σύγκριση με την φαινόλη, αμφότερες οι *m*-νιτροφαινόλη και *p*-νιτροφαινόλη είναι ισχυρότερα οξέα. Το ενισχυτικό φαινόμενο της νιτροομάδας είναι μεγαλύτερο στην *para* θέση, αν και μακρύτερα από το -OH.

Ένα μέρος της ενισχυτικής ικανότητας της νιτροομάδας προέρχεται από το επαγωγικό φαινόμενο απόσπασης ηλεκτρονίων.

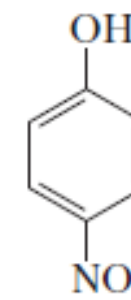
Επιπρόσθετα, υποκατάσταση με νιτροομάδα στις θέσεις *ortho* και *para* αυξάνει την οξύτητα, επειδή το αρνητικό φορτίο του ιόντος φαινοξειδίου μετατοπίζεται πάνω σ' ένα οξυγόνο της νιτροομάδας.



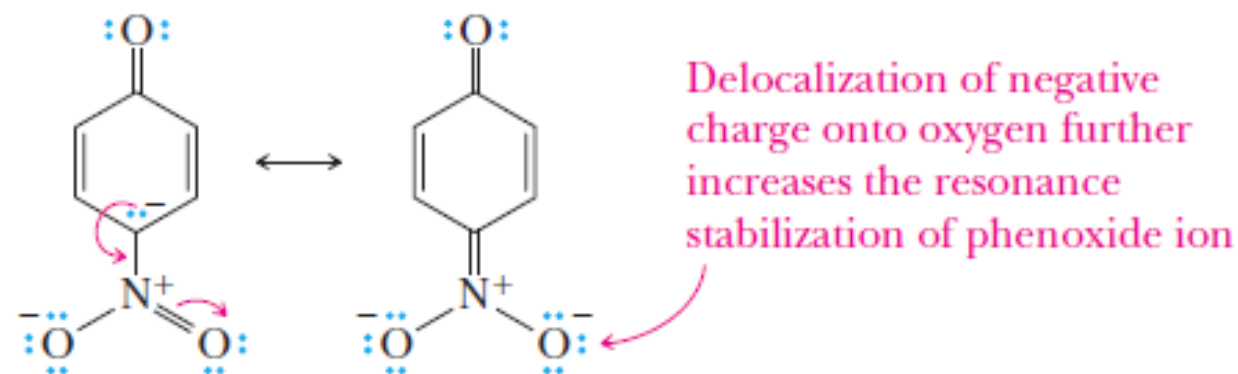
Phenol
 pK_a 9.95



m-Nitrophenol
 pK_a 8.28



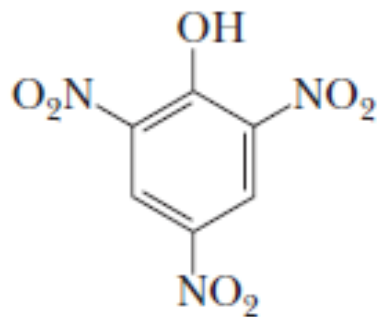
p-Nitrophenol
 pK_a 7.15



4. Φαινόλες

Οξύτητα των φαινολών

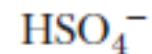
Η συνδυαστική ενισχυτική δράση του επαγωγικού φαινομένου και του συντονισμού της νιτροομάδας είναι τέτοια, έτσι ώστε η 2,4,6-τρινιτροφαινόλη (πικρικό οξύ) είναι ισχυρότερο οξύ από το φωσφορικό και το όξινο θειικό ιόν.



2,4,6-Trinitrophenol
(Picric acid)
 pK_a 0.38



Phosphoric acid
 pK_a 2.1



Hydrogen sulfate ion
 pK_a 1.92

Βιβλιογραφία

Brown W.H., Iverson B.L., Anslyn E.V., Foote C.S., Novak B.M., **2014**. Organic Chemistry, 7th Edition, Wadsworth Cengage Learning, U.S.A.