

Τα δεδομένα της ζωής: Η χημεία είναι η εξήγηση των βιολογικών φαινομένων

Marmaduke St. John / Alamy



1

ΜΕΡΟΣ 1: ΤΑ ΜΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Όλα όσα κάνουν τα έμβια όντα μπορούν να γίνουν κατανοητά από τη μελέτη της κίνησης των ατόμων

Richard P. Feynman. *Lectures on Physics*, Addison-Wesley, 1963

◀ Σπερματοκύτταρο γονιμοποιεί ένα ωάριο

ΒΑΣΙΚΟ ΕΡΩΤΗΜΑ

Τα μόρια είναι αβιοτικά. Ωστόσο, οι ιδιότητες των έμβιων οργανισμών προκύπτουν από τις ιδιότητες των μορίων. **Παρά τη θεαματική ποικιλομορφία της ζωής, την πολύπλοκη δομή των βιολογικών μορίων, και την πολυπλοκότητα των μηχανισμών της ζωής, μπορούμε να ερμηνεύσουμε τελικά τη ζωή με χημικούς όρους;**

Τα μόρια είναι αβιοτικά. Ωστόσο, με την κατάλληλη διευθέτηση και τον κατάλληλο αριθμό, τα μόρια συνθέτουν τα έμβια όντα. Αυτά τα έμβια συστήματα διακρίνονται από τον άβιο κόσμο επειδή διαθέτουν ορισμένες αξιοσημείωτες ιδιότητες. Μπορούν να αναπτυχθούν, να κινηθούν, να επιτελέσουν τη θαυμαστή χημεία του μεταβολισμού, να ανταποκριθούν στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος, και, το πιο σημαντικό, να αναπαράχθούν με εξαιρετική πιστότητα. Η σύνθετη δομή και συμπεριφορά των έμβιων οργανισμών υποκρύπτει τη βασική αλήθεια ότι η μοριακή τους σύσταση μπορεί να περιγραφεί και να γίνει κατανοητή. Η χημεία του ζωντανού κυττάρου προσομοιάζει με τη χημεία των οργανικών αντιδράσεων. Πράγματι, τα κυτταρικά συστατικά, ή **βιομόρια (biomolecules)**, πρέπει να συμμορφώνονται με τις χημικές και φυσικές αρχές που διέπουν όλη την ύλη. Παρά τη θεαματική ποικιλομορφία της ζωής, την πολυπλοκότητα των βιολογικών δομών, καθώς και την περιπλοκότητα των ζωτικών μηχανισμών, οι λειτουργίες της ζωής μπορούν τελικά να ερμηνευτούν με χημικούς όρους. Η χημεία είναι η λογική των βιολογικών φαινομένων. Οι έμβιοι οργανισμοί είναι αυτο-συντηρούμενα συστήματα χημικών αντιδράσεων.

1.1 Ποιες είναι οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των έμβιων συστημάτων;

Πρώτον, η πιο προφανής ιδιότητα των **έμβιων οργανισμών (living organisms)** είναι ότι πρόκειται για **ιδιαίτερα περίπλοκα συστήματα με**

ΚΑΙΡΙΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

- 1.1 Ποιες είναι οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των έμβιων συστημάτων;
- 1.2 Τι τύπου μόρια είναι τα βιομόρια;
- 1.3 Ποια είναι η δομική οργάνωση των σύνθετων βιομορίων;
- 1.4 Πώς οι ιδιότητες των βιομορίων αντικατοπτρίζουν την καταλληλότητά τους για την έμβια κατάσταση;
- 1.5 Ποια είναι η οργάνωση και η δομή των κυττάρων;
- 1.6 Τι είναι οι ιοί;

υψηλή οργάνωση (**ΕΙΚΟΝΑ 1.1**). Για παράδειγμα, οι οργανισμοί που είναι αρκετά μεγάλοι και μπορούν να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι αποτελούνται ουσιαστικά από πολλά **κύτταρα (cells)** διαφορετικών τύπων. Με τη σειρά τους, αυτά τα κύτταρα διαθέτουν υποκυτταρικές δομές, που ονομάζονται **οργανίδια (organelles)**, οι οποίες αποτελούν συγκροτήματα πολύ μεγάλων πολυμερών μορίων που ονομάζονται **μακρομόρια (macromolecules)**. Τα ίδια τα μακρομόρια παρουσιάζουν έναν εξαιρετικό βαθμό οργάνωσης στην περίπλοκη τρισδιάστατη αρχιτεκτονική τους, παρότι αποτελούνται από απλούστερα σύνολα χημικών δομικών λίθων, όπως τα σάκχαρα και τα αμινοξέα. Πράγματι, η πολύπλοκη τρισδιάστατη δομή ενός μακρομορίου, γνωστή ως **διαμόρφωση (conformation)**, είναι αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μονομερών μονάδων, σύμφωνα με τις μεμονωμένες χημικές τους ιδιότητες.

Δεύτερον, οι **δομές των βιολογικών συστημάτων εξυπηρετούν λειτουργικούς σκοπούς**. Δηλαδή, οι βιολογικές δομές διαδραματίζουν ρόλο στην ύπαρξη του οργανισμού. Από τα μεγαλύτερα μέρη των οργανισμών, όπως τα μέλη και τα όργανα, έως τους χημικούς παράγοντες του μεταβολισμού, όπως τα ένζυμα και τα μεταβολικά ενδιάμεσα προϊόντα, σε κάθε συστατικό μπορεί να αποδοθεί μια βιολογική σκοπιμότητα. Πράγματι, είναι αυτό το χαρακτηριστικό της λειτουργίας των βιολογικών δομών που διαχωρίζει την επιστήμη της Βιολογίας από τις μελέτες του αβιοτικού κόσμου, όπως η Χημεία, η Φυσική, και η Γεωλογία. Στη βιολογία, είναι πάντα σημαντικό να αναζητηθεί η σκοπιμότητα των παρατηρούμενων δομών, συνόλων, ή προτύπων, δηλαδή, να τεθεί το ερώτημα ποιά λειτουργικό ρόλο εξυπηρετούν στον οργανισμό.

Τρίτον, τα **έμβια συστήματα συμμετέχουν ενεργά σε μετασχηματισμούς ενέργειας**. Η διατήρηση της ιδιαίτερα οργανωμένης δομής και λειτουργίας των έμβιων συστημάτων εξαρτάται από την ικανότητά τους να προσλαμβάνουν ενέργεια από το περιβάλλον. Η υπέρτατη πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος. Η ηλιακή ενέργεια ρέει από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (οργανισμούς ικανούς να αιχμαλωτίζουν την ηλιακή ενέργεια με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης), μέσω των τροφικών αλυσίδων στους φυτοφάγους και τελικά στους σαρκοφάγους θηρευτές

στην κορυφή της τροφικής πυραμίδας (**ΕΙΚΟΝΑ 1.2**). Η βιόσφαιρα αποτελεί έτσι ένα σύστημα, μέσω του οποίου ρέει η ενέργεια. Οι οργανισμοί αιχμαλωτίζουν μέρος αυτής της ενέργειας, είτε μέσω της φωτοσύνθεσης, είτε μέσω του μεταβολισμού της τροφής, σχηματίζοντας ειδικά ενεργειακά βιομόρια, από τα οποία το **ATP** και το **NADPH** είναι τα δύο πιο γνωστά παραδείγματα (**ΕΙΚΟΝΑ 1.3**). (Οι πιο κοινές συντομογραφίες, όπως ATP και NADPH, ορίζονται στο εσωτερικό οπισθόφυλλο αυτού του βιβλίου). Τα ATP και NADPH αποτελούν ενεργειακά βιομόρια, επειδή αντιπροσωπεύουν χημικά χρήσιμες μορφές της αποθηκευμένης ενέργειας. Σε επόμενα κεφάλαια θα εξερευνήσουμε τη χημική βάση αυτής της αποθηκευμένης ενέργειας. Προς το παρόν, αρκεί να αναφέρουμε ότι όταν αυτά τα μόρια αντιδρούν με άλλα μόρια στο κύτταρο, η ενέργεια που απελευθερώνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επάγει μη ευνοούμενες ενεργειακά διαδικασίες. Δηλαδή, τα ATP και NADPH, και οι συναφείς ενώσεις είναι οι πηγές ενέργειας που τροφοδοτούν τις ενεργειακά απαιτητικές δραστηριότητες του κυττάρου, συμπεριλαμβανομένων της βιοσύνθεσης, της κίνησης, της ωσμωτικής κίνησης ενάντια στη βαθμίδωση συγκέντρωσης, και σε ειδικές περιπτώσεις, της εκπομπής φωτός (βιοφωταύγεια). Μόνο μετά τον θάνατο ένας οργανισμός φθάνει σε ισορροπία με το αβιοτικό περιβάλλον του. Η **ζωντανή κατάσταση χαρακτηρίζεται από τη ροή της ενέργειας μέσω του οργανισμού**. Με κατανάλωση ενέργειας, ο οργανισμός μπορεί να διατηρήσει την περίπλοκη τάξη και λειτουργία του μακριά από την ισορροπία (σε σχέση με το περιβάλλον του), αλλά ακόμη να βρίσκεται σε μια κατάσταση φαινομενικής σταθερότητας σε σχέση με τον χρόνο. Αυτή η κατάσταση της φαινομενικής σταθερότητας ή η λεγόμενη **σταθερή κατάσταση (steady state)**, είναι στην πραγματικότητα μια πολύ δυναμική κατάσταση: ενέργεια και ύλη καταναλώνονται από τον οργανισμό και χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της σταθερότητας και της τάξης του. Αντίθετα, η άβια ύλη, όπως αποδεικνύεται από το σύμπαν συνολικά, κινείται προς μια κατάσταση αυξανόμενης αταξίας ή με θερμοδυναμικούς όρους, μια κατάσταση μέγιστης **εντροπίας (entropy)**.

Τέταρτον, τα **έμβια συστήματα διαθέτουν μια αξιοση-**

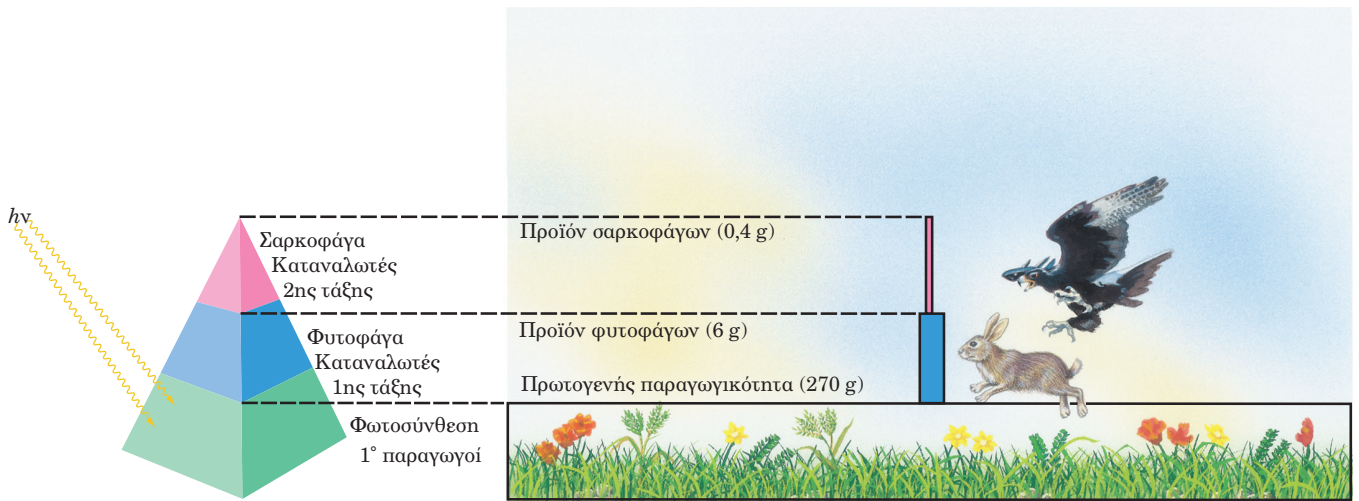
Εικόνα 1.1 (α) *Theropithecus gelada*, μπαμπούνος ιθαγενής στα αιθιοπικά υψίπεδα. **(β)** Τροπική orchidea (*Masdevallia norops*), Ισημερινός.



(α)

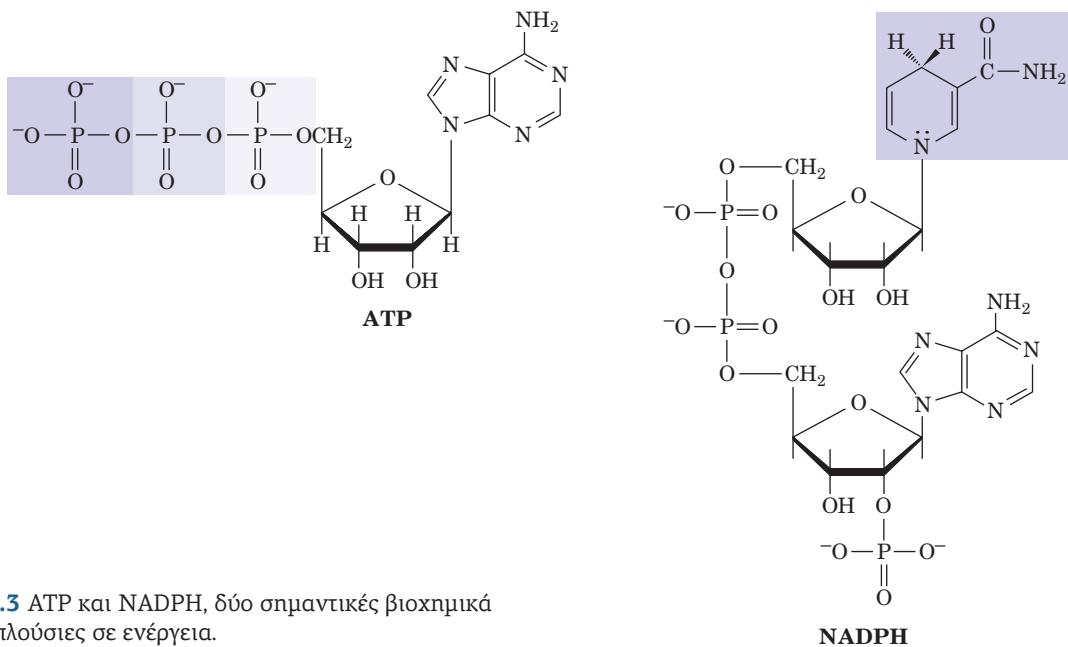


(β)



Παραγωγικότητα ανά τετραγωνικό μέτρο σε έναν αγρό του Τεννεσί

Εικόνα 1.2 Η τροφική πυραμίδα. Φωτοσυνθετικοί οργανισμοί στη βάση δεσμεύουν τη φωτεινή ενέργεια. Τα φυτοφάγα και τα σαρκοφάγα αντλούν την ενέργειά τους από αυτούς τους πρωτογενείς παραγωγούς.

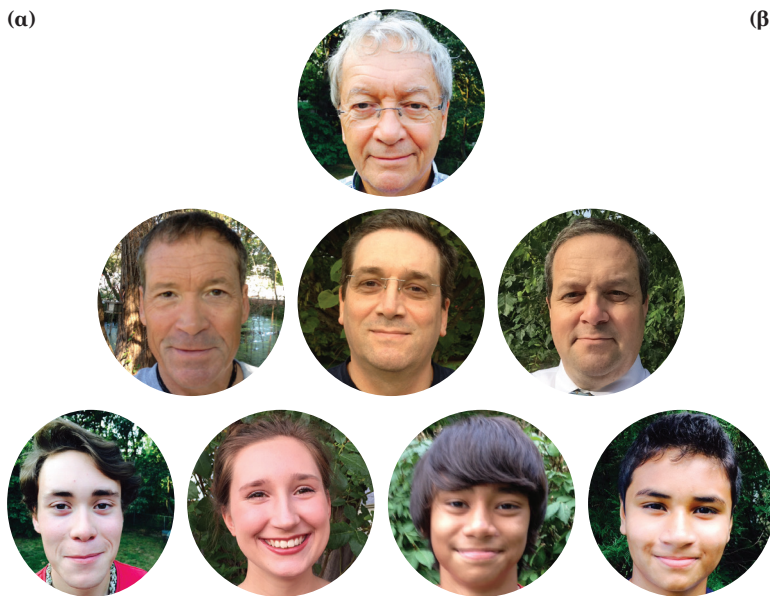


Εικόνα 1.3 ATP και NADPH, δύο σημαντικές βιοχημικές ενώσεις, πλούσιες σε ενέργεια.

μείωση ικανότητα για αυτο-αντιγραφής. Από γενεά σε γενεά, οι οργανισμοί αναπαράγουν σχεδόν πανομοιότυπα αντίγραφα του εαυτού τους. Αυτή η αυτο-αντιγραφή μπορεί να προχωρήσει με μια ποικιλία μηχανισμών, που κυμαίνονται από την απλή διαίρεση στα βακτήρια έως τη φυλετική αναπαραγωγή στα φυτά και στα ζώα, αλλά σε κάθε περίπτωση χαρακτηρίζεται από έναν εκπληκτικό βαθμό πιστότητας (**ΕΙΚΟΝΑ 1.4**). Πράγματι, εάν η ακρίβεια της αυτο-αντιγραφής ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, η εξέλιξη των οργανισμών θα παρεμποδιζόταν. Αυτό συμβαίνει επειδή η εξέλιξη εξαρτάται από τη φυσική επιλογή που λειτουργεί σε μεμονωμένους οργανισμούς οι οποίοι ποικίλλουν ελαφρώς στην προσαρμοστικότητα τους για

το φυσικό περιβάλλον. Η πιστότητα της αυτο-αντιγραφής βρίσκεται τελικά στη χημική φύση του γενετικού υλικού. Η ουσία αυτή αποτελείται από πολυμερείς αλυσίδες δεοξυριβονουκλεϊκού οξέος, ή **DNA**, οι οποίες είναι δομικά συμπληρωματικές μεταξύ τους (**ΕΙΚΟΝΑ 1.5**). Αυτά τα μόρια μπορούν να δημιουργήσουν νέα αντίγραφα του εαυτού τους σε μία αυστηρά εκτελεσμένη διαδικασία πολυμερισμού που εξασφαλίζει μια πιστή αντιγραφή των αρχικών αλυσίδων του DNA. Αντίθετα, τα μόρια του άβιου κόσμου στερούνται αυτής της ικανότητας αναπαραγωγής. Ένας πρωτόγονος μηχανισμός αναπαραγωγής πρέπει να υπήρχε κατά τη δημιουργία της ζωής.

(α)



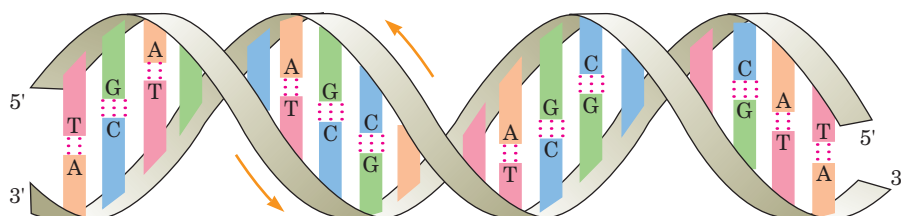
(β)



(γ)



Εικόνα 1.4 Οι οργανισμοί μοιάζουν με τους γονείς τους. (α) Η γενεαλογία των Garrett. Από την κορυφή προς τη βάση από τα αριστερά προς τα δεξιά: Reg Garrett. Οι υιοί Jeffrey, Randal, και Robert. Τα εγγόνια του Jackson, Bella, Reggie και Ricky. (β) Ουρακοτάγκος με το βρέφος του. (γ) Η οικογένεια Grisham. Από την κορυφή προς τη βάση από τα αριστερά προς τα δεξιά: Charles και Rosemary. Ο υιός David, η κόρη Emily με τις εγγονές Annie και May, ο υιός Andrew.



Εικόνα 1.5 Η διπλή έλικα DNA. Δύο συμπληρωματικές πολυνουκλεοτιδικές αλυσίδες που εκτείνονται προς αντίθετες κατευθύνσεις μπορούν να ενωθούν μέσω δεσμών υδρογόνου που σχηματίζονται μεταξύ των αζωτούχων βάσεων τους. Οι συμπληρωματικές νουκλεοτιδικές αλληλουχίες των δύο αλυσίδων δημιουργούν τη δομική συμπληρωματικότητα.

1.2 | Τι είδους μόρια είναι τα βιομόρια;

Η χημική σύσταση της έμβιας ύλης διαφέρει σαφώς από τη σχετική αφθονία των στοιχείων στον φλοιό της Γης (**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1**). Υδρογόνο, οξυγόνο, άνθρακας, και άζωτο αποτελούν περισσότερο από το 99% των ατόμων του ανθρώπινου σώματος, με τα περισσότερα από τα άτομα H και O να απαντούν με τη μορφή H_2O . Το οξυγόνο, το

πυρίτιο, το αργίλιο, και ο σίδηρος είναι τα πιο άφθονα άτομα στον φλοιό της Γης, με το υδρογόνο, τον άνθρακα, και το άζωτο να είναι σχετικά σπάνια (λιγότερο από 0,2% το καθένα).

Το μοριακό άζωτο (N_2) είναι το κυρίαρχο αέριο στην ατμόσφαιρα, και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπάρχει σε ποσοστό 0,04%, μια μικρή, αλλά κρίσιμη ποσότητα. Το οξυγόνο είναι επίσης άφθονο στην ατμόσφαιρα και

Πίνακας 1.1		Σύσταση του φλοιού της Γης*, του θαλασσινού νερού, και του ανθρώπινου σώματος*			
Φλοιός της Γης		Θαλασσινό νερό		Ανθρώπινο σώμα†	
Στοιχείο	%	Μόριο	mM	Στοιχείο	%
O	47	Cl ⁻	548	H	63
Si	28	Na ⁺	470	O	25,5
Al	7,9	Mg ²⁺	54	C	9,5
Fe	4,5	SO ₄ ²⁻	28	N	1,4
Ca	3,5	Ca ²⁺	10	Ca	0,31
Na	2,5	K ⁺	10	P	0,22
K	2,5	HCO ₃ ⁻	2,3	Cl	0,08
Mg	2,2	NO ₃ ⁻	0,01	K	0,06
Ti	0,46	HPO ₄ ²⁻	<0,001	S	0,05
H	0,22			Na	0,03
C	0,19			Mg	0,01

* Στον πίνακα τα δεδομένα για τον φλοιό της Γης και για το ανθρώπινο σώμα παρουσιάζονται ως ποσοστά του συνολικού αριθμού ατόμων. Τα δεδομένα για το θαλασσινό νερό παρουσιάζονται σε millimoles ανά λίτρο. Τα δεδομένα για τον φλοιό της Γης δεν συμπεριλαμβάνουν το νερό, ενώ τα δεδομένα για το ανθρώπινο σώμα το συμπεριλαμβάνουν.

† Τα ιχνοστοιχεία που βρέθηκαν στο ανθρώπινο σώμα να επιτελούν απαραίτητες βιολογικές λειτουργίες συμπεριλαμβάνουν τα Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Mo, I, Ni και Se.

στους ωκεανούς. Ποια ιδιότητα ενώνει τα H, O, C, και N και καθιστά αυτά τα άτομα τόσο κατάλληλα για τη χημεία της ζωής; Είναι η ικανότητά τους να σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς μέσω διαμοιρασμού ζευγών ηλεκτρονίων. Επιπλέον, τα στοιχεία H, C, N και O είναι από τα ελαφρύτερα στοιχεία του περιοδικού πίνακα ικανά να σχηματίσουν τέτοιου είδους δεσμούς (**ΕΙΚΟΝΑ 1.6**). Επειδή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι αντιστρόφως ανάλογη με τα ατομικά βάρη των ατόμων που συμμετέχουν, τα H, C, N, και O σχηματίζουν τους ισχυρότερους ομοιοπολικούς δεσμούς. Δύο άλλα στοιχεία που σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς, ο φωσφόρος (φωσφορικά [$-\text{OPO}_3^{2-}$] παράγωγα) και το θείο, διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στα βιομόρια.

1.2α Τα βιομόρια είναι ενώσεις του άνθρακα

Όλα τα βιομόρια περιέχουν άνθρακα (C). Η επικράτηση του C οφείλεται στην απaráμιλλη ευελιξία του για σχηματισμό σταθερών ομοιοπολικών δεσμών μέσω του διαμοιρασμού ζευγών ηλεκτρονίων. Ο άνθρακας μπορεί να σχηματίσει έως τέσσερις τέτοιους δεσμούς με τον διαμοιρασμό καθενός από τα τέσσερα ηλεκτρόνια της εξωτερικής του στιβάδας με τα ηλεκτρόνια που συνεισφέρονται από άλλα άτομα. Τα άτομα που βρίσκονται συνήθως σε ομοιοπολική σύνδεση με τον C είναι ο ίδιος ο C, και τα H, O, N. Το υδρογόνο μπορεί να δημιουργήσει έναν τέτοιο δεσμό δίνοντας το μοναδικό του ηλεκτρόνιο για τον σχηματισμό ενός ζεύγους ηλεκτρονίων. Το οξυγόνο, με δύο μονήρη ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα του μπορεί να συμμετέχει σε δύο ομοιοπολικούς δεσμούς, και το άζωτο, που έχει τρία μονήρη ηλεκτρόνια, μπορεί να σχηματίσει τρεις τέτοιους ομοιοπολικούς δεσμούς. Επιπλέον, στα βιομόρια τα άτομα C, N, και O μπορούν να

Ατομα	Σύζευξη e ⁻	Ομοιοπο- λικός δεσμός	Ενέργεια δεσμού (kJ/mol)
H· + H·	→ H:H	H—H	436
·C· + H·	→ ·C:H	—C—H	414
·C· + ·C·	→ ·C:C·	—C—C—	343
·C· + ·N·	→ ·C:N·	—C—N—	292
·C· + ·O·	→ ·C:O·	—C—O—	351
·C· + ·C·	→ :C::C:	>C=C<	615
·C· + ·N·	→ :C::N:	>C=N—	615
·C· + ·O·	→ :C::O:	>C=O	686
·O· + ·O·	→ :O::O:	—O—O—	142
·O· + ·O·	→ :O::O:	O=O	402
·N· + ·N·	→ :N::N:	N≡N	946
·N· + H·	→ :N:H	>N—H	393
·O· + H·	→ :O:H	—O—H	460

Εικόνα 1.6 Σχηματισμός ομοιοπολικού δεσμού μέσω κοινού ζεύγους ηλεκτρονίων.

μοιραστούν δύο ζεύγη ηλεκτρονίων για τον σχηματισμό διπλών δεσμών μεταξύ τους, μια ιδιότητα που ενισχύει τη χημική τους ευελιξία. Ο άνθρακας και το άζωτο μπορούν ακόμη να μοιραστούν και τρία ζεύγη ηλεκτρονίων για τον σχηματισμό τριπλών δεσμών.

Δύο ιδιότητες των ομοιοπολικών δεσμών που σχηματίζει ο άνθρακας χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Η μία είναι η ικανότητα του άνθρακα να σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με τον εαυτό του. Η άλλη είναι η τετραεδρική φύση των τεσσάρων ομοιοπολικών δεσμών, όταν τα άτομα άνθρακα σχηματίζουν μόνο απλούς δεσμούς. Μαζί αυτές οι ιδιότητες δίνουν τη δυνατότητα για μια απίστευτη ποικιλία γραμμικών, διακλαδισμένων, και κυκλικών ενώσεων του C. Η ποικιλομορφία αυτή αυξάνεται περαιτέρω με τη δυνατότητα συμμετοχής των ατόμων N, O και H σε αυτές τις ενώσεις (ΕΙΚΟΝΑ 1.7). Μπορούμε λοιπόν να φανταστούμε τη δυνατότητα του C να δημιουργεί σύνθετες τρισδιάστατες δομές. Αυτές οι δομές, δυνάμει της συμμετοχής των ατόμων N, O, και H, μπορούν να επιδείξουν μοναδικές χημικές ιδιότητες κατάλληλες για τους έμβιους οργανισμούς. Έτσι, μπορούμε να θέσουμε το ερώτημα, υπάρχει κάποιο σχέδιο

ή υποκείμενη οργάνωση που φέρνει την τάξη σε αυτή την εκπληκτική δυναμικότητα;

1.3 Ποια είναι η δομική οργάνωση των σύνθετων βιομορίων;

Η εξέταση της χημικής σύστασης των κυττάρων αποκαλύπτει μια εκπληκτική ποικιλία οργανικών ενώσεων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μοριακών διαστάσεων (ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2). Δεδομένου ότι αυτή η πολυπλοκότητα διευθετείται και τα βιομόρια ταξινομούνται σύμφωνα με τις ομοιότητες των μεγεθών και των χημικών ιδιοτήτων τους, αναδεικνύεται ένα πρότυπο οργάνωσης. Τα βιομόρια δημιουργούνται σύμφωνα με μια δομική ιεραρχία: τα απλά μόρια είναι οι μονάδες για την οικοδόμηση των σύνθετων δομών.

Η μοριακή σύσταση της έμβιας ύλης δεν αντικατοπτρίζει τυχαία τις άπειρες δυνατότητες συνδυασμού των ατόμων C, H, O, και N. Αντ' αυτού, απαντά μόνο ένα περιορισμένο σύνολο συνδυασμών, και οι συνδυασμοί αυτοί μοιράζονται ορισμένες ιδιότητες που είναι απαραί-

Πίνακας 1.2 Διαστάσεις βιομορίων

Οι διαστάσεις της μάζας * και του μήκους των βιομορίων δίδονται τυπικά σε daltons και νανόμετρα, αντίστοιχα. Ένα dalton (D) είναι περίπου ίσο με τη μάζα ενός ατόμου υδρογόνου, $1,66 \times 10^{-24} \text{g}$. Ένα νανόμετρο (nm) είναι 10^{-9}m ή $10 \text{ \AA}$ (angstroms).

	Μήκος	Μάζα	
		Daltons	Πικογραμμάρια
Βιομόριο	(Μακρὺς άξονας, nm)		
Νερό	0,3	18	
Αλανίνη	0,5	89	
Γλυκόζη	0,7	180	
Φωσfolιπίδιο	3,5	750	
Ριβονουκλεάση (μια μικρή πρωτεΐνη)	4	12.600	
Ανοσοσφαιρίνη G (IgG)	14	150.000	
Μυοσίνη (μια μεγάλη μυική πρωτεΐνη)	160	470.000	
Ριβόσωμα (βακτηριακό)	18	2.520.000	
Βακτηριοφάγος φX174 (ένας πολύ μικρός βακτηριακός ιός)	25	4.700.000	
Σύμπλοκο αφυδρογονάσης του πυροσταφυλικού (ένα πολυενζυμικό σύμπλοκο)	60	7.000.000	
Ιός της μωσαϊκής του καπνού (φυτικός ιός)	300	40.000.000	$6,68 \times 10^{-5}$
Μιτοχόνδριο (ήπαρ)	1.500		1,5
Κύτταρο <i>Escherichia coli</i>	2.000		2
Χλωροπλάστης (φύλλο σπανακιού)	8.000		60
Ηπατοκύτταρο	20.000		8.000

*Η μοριακή μάζα εκφράζεται σε μονάδες daltons (D) ή kilodaltons (kD) σε αυτό το βιβλίο. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται ο χωρίς διαστάσεις όρος *μοριακό βάρος*, που συμβολίζεται ως M_r και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ενός μορίου προς 1 dalton μάζας.

[†]Τα χρησιμοποιούμενα προθέματα για τις δυνάμεις του 10 είναι:

10^6	mega	M	10^3	milli	m
10^3	kilo	k	10^6	micro	μ
10^{-1}	deci	d	10^9	nano	n
10^{-2}	centi	c	10^{12}	pico	p
			10^{15}	femto	f

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΛΕΙΦΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ:

ΚΥΚΛΙΚΗ:

ΔΙΑΚΛΑΔΙΣΜΕΝΗ:

ΕΠΙΠΕΔΗ: