

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ Ι

Διάλεξη 4

Ακολουθίες

Ε. Στεφανόπουλος

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

2 Νοεμβρίου 2021

Ακολουθίες

Ο πραγματικός αριθμός $\sqrt{2}$ είναι άρρητος, και μια τυπική προσέγγιση του είναι $\sqrt{2} = 1.41421356237 \dots$. Θεωρώντας τους ρητούς αριθμούς

$$a_1 = 1.4,$$

$$a_2 = 1.41,$$

$$a_3 = 1.414,$$

$$a_4 = 1.4142,$$

$$a_5 = 1.41421,$$

$$a_6 = 1.414213,$$

$$a_7 = 1.4142135,$$

$$a_8 = 1.41421356,$$

$$a_9 = 1.414213562, \dots$$

Η συλλογή αυτή παριστάνει προσεγγίσεις του $\sqrt{2}$ έτσι ώστε ο n στην τάξη όρος, a_n , είναι η προσέγγιση που περιέχει τα n πρώτα δεκαδικά ψηφία του αναπύγματος. Καθώς το n μεγαλώνει ο όρος a_n παρέχει μια καλύτερη προσέγγιση του $\sqrt{2}$, έτσι καθώς ο n **τείνει στο άπειρο**, ο a_n τείνει να γίνει ο $\sqrt{2}$. Η συλλογή αυτή είναι παράδειγμα μιας **ακολουθίας** αριθμών, και κάθε μέλος της συλλογής λέγεται **όρος της ακολουθίας**, συγκεκριμένα ο a_n λέγεται n -οστός όρος της ακολουθίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λέμε, επίσης, ότι η ακολουθία των a_n **τείνει**, ή **συγκλίνει** στον $\sqrt{2}$, ή ισοδύναμα ότι ο $\sqrt{2}$ είναι το **όριο** της ακολουθίας.

Ορισμός

Εάν S είναι ένα μη κενό σύνολο τότε κάθε συνάρτηση ορισμένη στο σύνολο των φυσικών αριθμών $\alpha : \mathbb{N} \rightarrow S$ λέγεται **ακολουθία** (sequence) του S . Αντί για $\alpha(n)$ γράφουμε a_n . Το a_1 λέγεται πρώτος όρος της ακολουθίας, το a_2 δεύτερος όρος, ..., το a_n n -οστός όρος της ακολουθίας. Μία ακολουθία γράφεται ως $(a_n)_{n=1}^{\infty}$, ή με παράθεση των όρων της $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, n \in \mathbb{N}$. Γράφουμε επίσης και (a_n) . Εάν οι a_n είναι πραγματικοί αριθμοί, δηλαδή $S \subset \mathbb{R}$, η $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ λέγεται ακολουθία πραγματικών αριθμών.

Παράδειγμα

Η ακολουθία των φυσικών αριθμών $1, 2, 3, \dots, n, \dots, n \in \mathbb{N}$. Εδώ $a_n = n, \forall n \in \mathbb{N}$.

Παράδειγμα

Η ακολουθία με όρους

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n}, \dots, \quad n \in \mathbb{N}$$

είναι η $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ με $a_n = 1/n, n \in \mathbb{N}$.

Παράδειγμα

Οι όροι της ακολουθίας $(a_n)_{n=1}^{\infty}$, όπου $a_n = (-1)^n$, $n \in \mathbb{N}$ είναι οι

$$-1, 1, -1, \dots, (-1)^n, \dots, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Παράδειγμα

Εάν c είναι ένας πραγματικός αριθμός τότε μπορούμε να ορίσουμε την ακολουθία

$$c, c, c, \dots, c, \dots$$

Εδώ είναι $a_n = c$, $n \in \mathbb{N}$. Η παραπάνω ακολουθία λέγεται **σταθερή** ακολουθία.

Διακρίνουμε τους άπειρους **όρους της ακολουθίας** $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots$ από το **σύνολο τιμών της ακολουθίας** $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots\}$ που μπορεί να είναι πεπερασμένο. Για παράδειγμα για την ακολουθία $((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$ έχουμε ότι οι όροι της ακολουθίας είναι οι $-1, 1, -1, 1, \dots, (-1)^n, \dots$ ενώ το σύνολο τιμών είναι το $\{(-1)^n : n \in \mathbb{N}\} = \{-1, 1\}$.

Ορισμός

Εάν $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$ είναι ακολουθίες πραγματικών αριθμών, τότε:

- ① Θα λέμε ότι οι ακολουθίες είναι **ίσες** εάν $a_n = b_n, \forall n \in \mathbb{N}$.
- ② Η ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$, όπου $c_n = a_n + b_n, n \in \mathbb{N}$ θα λέγεται **άθροισμα** των ακολουθιών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$.
- ③ Η ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$, όπου $c_n = a_n - b_n, n \in \mathbb{N}$ θα λέγεται **διαφορά** των ακολουθιών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$.
- ④ Η ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$, όπου $c_n = a_n b_n, n \in \mathbb{N}$ θα λέγεται **γινόμενο** των ακολουθιών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$.
- ⑤ Εάν $b_n \neq 0, \forall n \in \mathbb{N}$ η ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$, με $c_n = a_n / b_n, n \in \mathbb{N}$ θα λέγεται **πηλίκο** των ακολουθιών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$.

• Εάν $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ είναι μια ακολουθία και f είναι μία συνάρτηση τέτοια ώστε το $f(a_n)$ να ορίζεται για κάθε n , τότε μπορούμε να ορίσουμε την ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$ όπου $c_n = f(a_n), n \in \mathbb{N}$. Για παράδειγμα για $f(x) = \sqrt{x}, x \geq 0$ ορίζουμε

$$(\sqrt{a_n})_{n=1}^{\infty}, \text{ με όρους } \sqrt{a_1}, \sqrt{a_2}, \sqrt{a_3}, \dots, \sqrt{a_n}, \dots, \text{ εάν } a_n \geq 0, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Για την ακολουθία $a_n = 1/n$, $n \in \mathbb{N}$ παρατηρούμε ότι $a_1 = 1 \leq 1$, $a_2 = 1/2 < 1$, και γενικότερα $a_n = 1/n < 1$, $\forall n > 1$. Επίσης ισχύει $a_n > 0$, $\forall n \in \mathbb{N}$. Τελικά έχουμε $0 < a_n \leq 1$, $\forall n \in \mathbb{N}$.

Ορισμός

Μία ακολουθία πραγματικών αριθμών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ λέγεται:

- ① **Άνω φραγμένη** (bounded above) εάν υπάρχει πραγματικός αριθμός M τέτοιος ώστε $a_n \leq M$, $\forall n \in \mathbb{N}$. Ο αριθμός M λέγεται **άνω φράγμα** (upper bound) της $(a_n)_{n=1}^{\infty}$.
- ② **Κάτω φραγμένη** (bounded below) εάν υπάρχει πραγματικός αριθμός m τέτοιος ώστε $a_n \geq m$, $\forall n \in \mathbb{N}$. Ο αριθμός m λέγεται **κάτω φράγμα** (lower bound) της $(a_n)_{n=1}^{\infty}$.
- ③ **Φραγμένη** (bounded) εάν είναι άνω και κάτω φραγμένη.

Παρατηρούμε ότι το άνω φράγμα ακολουθίας, εάν αυτό υπάρχει, δεν είναι μοναδικό, γιατί εάν M είναι άνω φράγμα της $(a_n)_{n=1}^{\infty}$, τότε για κάθε $\delta > 0$ το $M + \delta$ είναι επίσης άνω φράγμα, αφού $a_n \leq M < M + \delta$, $\forall n \in \mathbb{N}$. Το ανάλογο ισχύει και για το κάτω φράγμα.

Θεώρημα

Μία ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ είναι φραγμένη εάν και μόνον εάν υπάρχει πραγματικός αριθμός L τέτοιος ώστε $|a_n| \leq L, \forall n \in \mathbb{N}$.

Παράδειγμα

Θεωρούμε την ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ με

$$a_n = \frac{\sin n}{n}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Να εξετασθεί εάν η ακολουθία είναι φραγμένη.

Παρατηρούμε ότι

$$|a_n| = \left| \frac{\sin n}{n} \right| \leq \frac{1}{n} \leq 1, \quad \forall n \in \mathbb{N},$$

οπότε από το Θεώρημα 4 έπεται ότι η ακολουθία είναι φραγμένη.

Παράδειγμα

Να δειχθεί ότι η ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ με

$$a_n = \frac{2^n}{n!}, \quad n \in \mathbb{N}$$

είναι φραγμένη. Υπολογίζουμε μερικούς όρους της ακολουθίας

$$a_1 = \frac{2}{1} = 2, \quad a_2 = \frac{2^2}{2!} = 2, \quad a_3 = \frac{2^3}{3!} = \frac{4}{3} < 2, \quad a_4 = \frac{2^4}{4!} = \frac{2}{3} < 2.$$

Παρατηρούμε ότι για $n \geq 3$ ισχύει

$$a_n = \frac{2^n}{n!} = \frac{2}{1} \frac{2}{2} \frac{2}{3} \cdots \frac{2}{n} = 2 \frac{2}{3} \cdots \frac{2}{n} \leq 2 \left(\frac{2}{3}\right)^{n-2}, \quad (1)$$

οπότε $0 < a_n \leq 2$, $\forall n \in \mathbb{N}$, άρα η ακολουθία είναι φραγμένη. Από την (1) παίρνουμε

$$\frac{1}{n!} \leq \frac{1}{2} \frac{1}{3^{n-2}}, \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (2)$$

Ορισμός

Η ακολουθία πραγματικών αριθμών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ λέγεται:

- ① **Αύξουσα** (increasing) εάν $a_n \leq a_{n+1}$ και **γνησίως αύξουσα** (strictly increasing) εάν $a_n < a_{n+1}$, $\forall n \in \mathbb{N}$.
- ② **Φθίνουσα** (decreasing) εάν $a_n \geq a_{n+1}$ και **γνησίως φθίνουσα** (strictly decreasing) εάν $a_n > a_{n+1}$, $\forall n \in \mathbb{N}$.
- ③ Μία ακολουθία που είναι αύξουσα, ή φθίνουσα (γνησίως αύξουσα, ή γνησίως φθίνουσα) λέγεται **μονότονη (γνησίως μονότονη)** (monotone (strictly monotone)).

Παράδειγμα

Να εξετασθούν ως προς τη μονοτονία οι ακολουθίες με γενικό όρο

$$(1) a_n = r^n, \quad r > 0, \quad (2) a_n = \sqrt[n]{2}, \quad (3) a_n = \frac{2^n}{n!}, \quad (4) a_n = \frac{n^n}{n!}.$$

Παράδειγμα

Να δείχθει ότι η ακολουθία

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, \quad n \in \mathbb{N}$$

είναι γνησίως αύξουσα και φραγμένη.

Με χρήση του διωνυμικού θεωρήματος υπολογίζουμε

$$\begin{aligned} a_n &= \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{1}{n^k} = \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} \frac{1}{n^k} \\ &= 1 + \sum_{k=1}^n \frac{n(n-1)(n-2)\cdots(n-k+1)}{k!n^k} \\ &= 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \frac{n}{n} \frac{n-1}{n} \frac{n-2}{n} \cdots \frac{n-(k-1)}{n} \\ &= 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n}\right), \end{aligned}$$

όμοια

$$\begin{aligned}
 a_{n+1} &= \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+1} = \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} \frac{1}{(n+1)^k} \\
 &= 1 + \sum_{k=1}^n \binom{n+1}{k} \frac{1}{(n+1)^k} + \binom{n+1}{n+1} \frac{1}{(n+1)^{n+1}} \\
 &= 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(1 - \frac{2}{n+1}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n+1}\right) + \frac{1}{(n+1)^{n+1}}.
 \end{aligned}$$

Από τα αναπτύγματα των a_n και a_{n+1} , παρατηρούμε ότι

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n}\right) \leq \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) \left(1 - \frac{2}{n+1}\right) \cdots \left(1 - \frac{k-1}{n+1}\right),$$

για κάθε $k = 1, 2, \dots, n$ (στη πραγματικότητα η ανισότητα είναι αυστηρή για $2 \leq k \leq n$), ενώ ο τελευταίος όρος στο ανάπτυγμα του a_{n+1} είναι θετικός, άρα $a_n < a_{n+1}$. Έτσι η ακολουθία είναι γνησίως αύξουσα. Επειδή δε $a_1 = 2$ έπεται ότι $a_n \geq 2$, δηλαδή η ακολουθία είναι κάτω φραγμένη.

Αναζητώντας ένα άνω φράγμα της ακολουθίας και επειδή

$$\left(1 - \frac{1}{n+1}\right)\left(1 - \frac{2}{n+1}\right)\cdots\left(1 - \frac{k-1}{n+1}\right) \leq 1,$$

από το ανάπτυγμα του a_n έπεται ότι

$$\begin{aligned} a_n &\leq 1 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{k!} = 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \cdots + \frac{1}{n!} \\ &\leq 1 + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{2 \cdot 3^2} + \cdots + \frac{1}{2 \cdot 3^{n-2}} && \text{(από την (2))} \\ &= 2 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3^2} + \cdots + \frac{1}{3^{n-2}}\right) \\ &= 2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1 - 1/3^{n-1}}{1 - 1/3}\right) = 2 + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{1}{3^{n-1}}\right) < 2.75. \end{aligned}$$

Έτσι τελικά έχουμε ότι $2 \leq a_n < 2.75, \forall n \in \mathbb{N}$.

Παράδειγμα

Ας θεωρήσουμε την ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ με $a_n = 1/n$, $n \in \mathbb{N}$. Ισχυριζόμαστε ότι εάν ϵ είναι ένας αυθαίρετα μικρός θετικός αριθμός τότε υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ τέτοιος ώστε $0 < a_n < \epsilon$ για κάθε $n \geq N$.

Για την ακολουθία αυτή γνωρίζουμε ότι $0 < \dots < a_{n+1} < a_n < \dots < a_2 < a_1$. Δείχνουμε ότι για $\epsilon > 0$ δοσμένο, υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ τέτοιος ώστε $0 < a_N < \epsilon$, ισοδύναμα υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ με $1/N < \epsilon$ ή ισοδύναμα $1/\epsilon < N$. Πράγματι αν $[1/\epsilon]$ είναι το ακέραιο μέρος του $1/\epsilon$ επιλέγοντας $N = [1/\epsilon] + 1$ έχουμε $N > 1/\epsilon$, ή $a_N < \epsilon$. Δείξαμε λοιπόν ότι για κάθε $\epsilon > 0$ υπάρχει N τέτοιο ώστε $0 < a_N < \epsilon$. Στη πραγματικότητα δείξαμε ότι για κάθε $\epsilon > 0$ υπάρχει N έτσι ώστε $0 < a_n < \epsilon$, για όλα τα $n \geq N$ (γιατί:). Βλέπουμε λοιπόν ότι όλοι τελικά, δηλαδή από ένα N και έπειτα, οι όροι της ακολουθίας πλησιάζουν αυθαίρετα κοντά στο 0.

Παράδειγμα

Ας θεωρήσουμε την ακολουθία $a_n = \ell + (-1)^n/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$, όπου $\ell \in \mathbb{R}$.
 Ισχυριζόμαστε ότι εάν ϵ είναι ένας αυθαίρετα μικρός θετικός αριθμός τότε
 υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ τέτοιος ώστε $|a_n - \ell| < \epsilon$, για κάθε $n \geq N$.

Παρατηρούμε ότι

$$a_n - \ell = \frac{(-1)^n}{n} \Rightarrow |a_n - \ell| = \frac{1}{n},$$

κατά συνέπεια σύμφωνα με το προηγούμενο παράδειγμα για δοσμένο $\epsilon > 0$
 υπάρχει $N \in \mathbb{N}$, για παράδειγμα $N \geq \lceil 1/\epsilon \rceil + 1$, τέτοιο ώστε $1/n < \epsilon$ για όλα τα
 $n \geq N$, επομένως $|a_n - \ell| < \epsilon$, για κάθε $n \geq N$.

Ορισμός

Θα λέμε ότι η ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ **συγκλίνει** στον πραγματικό αριθμό L εάν η απόσταση $|a_n - L|$ γίνεται τελικά αυθαίρετα μικρή, δηλαδή για κάθε $\epsilon > 0$ υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ τέτοιο ώστε $|a_n - L| < \epsilon$, για όλα τα $n \geq N$. Εάν αυτό ισχύει θα λέμε ότι ο L είναι το **όριο** (limit) της ακολουθίας $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και θα γράφουμε

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = L.$$

Γράφουμε επίσης $a_n \rightarrow L$, καθώς $n \rightarrow \infty$.

Σύμφωνα με τον ορισμό βλέπουμε ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0,$$

μιας και για κάθε $\epsilon > 0$ υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ τέτοιο ώστε

$$\left| \frac{1}{n} - 0 \right| = \frac{1}{n} < \epsilon$$

για όλα τα $n \geq N$.

Παρατήρηση

Ας θεωρήσουμε την σταθερή ακολουθία $a_n = a$, $n \in \mathbb{N}$. Τότε $|a_n - a| = 0 < \epsilon$, για κάθε $\epsilon > 0$ και για κάθε $n \in \mathbb{N}$, επομένως

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a = a.$$

Θεώρημα (Μοναδικότητα του ορίου)

Έστω ότι η ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ συγκλίνει, τότε το όριό της είναι μοναδικό.

Θεώρημα

Έστω ότι η ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ συγκλίνει και έστω ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha,$$

τότε η ακολουθία είναι φραγμένη. Επιπλέον αν $|a_n| \leq M$, για κάθε $n \in \mathbb{N}$, με $M > 0$, τότε $|\alpha| \leq M$.

Θεώρημα (Ιδιότητες συγκλινουσών ακολουθιών)

Έστω ότι για τις ακολουθίες $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ και $(b_n)_{n=1}^{\infty}$ γνωρίζουμε ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \alpha, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} b_n = \beta.$$

Τότε ισχύουν οι ιδιότητες:

- ① $|a_n| \rightarrow |\alpha|$.
- ② $\lambda a_n \rightarrow \lambda \alpha$, για κάθε $\lambda \in \mathbb{R}$.
- ③ $\lambda a_n + \mu b_n \rightarrow \lambda \alpha + \mu \beta$, για κάθε $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.
- ④ $a_n b_n \rightarrow \alpha \beta$.
- ⑤ Εάν $b_n \neq 0$, για $n \geq N$ και $\beta \neq 0$, τότε $a_n/b_n \rightarrow \alpha/\beta$.
- ⑥ Εάν $a_n \leq b_n$, τότε $\alpha \leq \beta$.
- ⑦ **Ιδιότητα της παρεμβολής** Εάν για την ακολουθία $(c_n)_{n=1}^{\infty}$, ισχύει:
 - ① $a_n \leq c_n \leq b_n$, $\forall n \geq N$, και
 - ② $\alpha = \beta$, δηλαδή $a_n \rightarrow \alpha$, και $b_n \rightarrow \alpha$,

τότε $c_n \rightarrow \alpha$.

Παράδειγμα

Να εξετασθεί ως προς τη σύγκλιση η ακολουθία

$$a_n = \frac{2n+3}{n^2+1}, \quad n \in \mathbb{N}.$$

Διαιρώντας με το μεγιστοβάθμιο όρο n^2 αριθμητή και παρονομαστή έχουμε

$$a_n = \frac{2n+3}{n^2+1} = \frac{\frac{2n}{n^2} + \frac{3}{n^2}}{\frac{n^2}{n^2} + \frac{1}{n^2}} = \frac{\frac{2}{n} + \frac{3}{n^2}}{1 + \frac{1}{n^2}}.$$

Ο αριθμητής συγκλίνει στο 0, ενώ ο παρονομαστής συγκλίνει στο 1, άρα από την ιδιότητα του ορίου πηλίκου ακολουθιών έπεται ότι η ακολουθία συγκλίνει και

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n+3}{n^2+1} = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{n} + \frac{3}{n^2} \right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n^2} \right)} = \frac{0}{1} = 0.$$

Παράδειγμα

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1.$$

Αν $a_n = \sqrt[n]{n}$, τότε $a_n \geq 1$, $\forall n \in \mathbb{N}$, έτσι μπορούμε να γράψουμε

$$\sqrt[n]{n} = (1 + \delta_n)^2, \quad \delta_n \geq 0, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Υψώνοντας αρχικά στη n -οστή δύναμη έχουμε

$$n = (1 + \delta_n)^{2n} \Rightarrow \sqrt{n} = (1 + \delta_n)^n \Rightarrow \sqrt{n} \geq 1 + n\delta_n$$

όπου στη τελευταία συνεπαγωγή έγινε χρήση της ανισότητας Bernoulli. Έτσι

$$\sqrt{n} \geq 1 + n\delta_n \Rightarrow \delta_n \leq \frac{\sqrt{n} - 1}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}},$$

απ' όπου έπεται ότι $\delta_n \rightarrow 0$, καθώς $n \rightarrow \infty$. Τελικά

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + 2\delta_n + \delta_n^2) = 1.$$

Παράδειγμα

Κάθε πραγματικός αριθμός είναι το όριο μιας ακολουθίας ρητών αριθμών.

Έστω $r \in \mathbb{R}$. Εάν ο r είναι ρητός τότε η ακολουθία $(r_n)_{n=1}^{\infty}$ με $r_n = r, \forall n \in \mathbb{N}$ συγκλίνει προφανώς στον r . Έστω ότι ο r είναι άρρητος, τότε για κάθε φυσικό αριθμό n θα είναι $nr - 1 < [nr] \leq nr$, όπου με $[nr]$ συμβολίζουμε το ακέραιο μέρος του nr , απ' όπου έπεται ότι

$$r - \frac{1}{n} < \frac{[nr]}{n} \leq r, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Από το Θεώρημα της παρεμβολής έπεται ότι η ακολουθία $([nr]/n)_{n=1}^{\infty}$ συγκλίνει στον r .

Θεώρημα (Μονότονη σύγκλιση)

Έστω $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ μια μονότονη ακολουθία. Η ακολουθία αυτή συγκλίνει αν και μόνον αν είναι φραγμένη.

Παράδειγμα

Η ακολουθία

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, \quad n \in \mathbb{N},$$

είναι αύξουσα και φραγμένη με $2 \leq a_n < 2.75$, για κάθε $n \in \mathbb{N}$, άρα συγκλίνει σε κάποιο αριθμό στο διάστημα $[2, 2.75)$. Τον αριθμό αυτό συμβολίζουμε με e , τιμώντας έτσι τον Euler (1707–1783) ο οποίος χρησιμοποίησε τον αριθμό αυτό. Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο e είναι άρρητος και με ακρίβεια 15 δεκαδικών ψηφίων η τιμή του είναι $e = 2.718281828459045 \dots$. Έχουμε λοιπόν ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e.$$

Παράδειγμα

Ναδειχθεί ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^n = e^{-1}$$

Για $n > 1$ έχουμε

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right)^n = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(\frac{n-1}{n}\right)^{n-1} = \frac{1 - \frac{1}{n}}{\left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^{n-1}}$$

έτσι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^n = \frac{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n-1}\right)^{n-1}} = \frac{1}{e}$$

που είναι το ζητούμενο.

Παράδειγμα

Να δειχθεί ότι η ακολουθία

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{2n}, \quad n \in \mathbb{N},$$

συγκλίνει, και να υπολογισθεί το όριό της.

Παρατηρούμε ότι $a_n = b_n^2$ όπου

$$b_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, \quad n \in \mathbb{N},$$

και $b_n \rightarrow e$, καθώς $n \rightarrow \infty$, οπότε από τις ιδιότητες των συγκλινουσών ακολουθιών θα έχουμε

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{2n} = \left[\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \right]^2 = e^2.$$

Παρατήρηση (Η έννοια της υπακολουθίας)

Ας θεωρήσουμε την ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$. Οι ακολουθίες $a_2, a_4, a_6, \dots, a_{2n}, \dots$ και $a_1, a_3, a_5, \dots, a_{2n-1}, \dots$ λέγονται **υπακολουθίες** της $(a_n)_{n=1}^{\infty}$. Γενικότερα εάν $k_1 < k_2 < \dots < k_n < \dots$ είναι μία γνησίως αύξουσα ακολουθία φυσικών αριθμών τότε η ακολουθία $(a_{k_n})_{n=1}^{\infty}$ λέγεται **υπακολουθία** της $(a_n)_{n=1}^{\infty}$. Σημειώνουμε ότι η k μπορεί να ειδωθεί σαν μία γνησίως αύξουσα συνάρτηση $k: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ με τιμές $k(n) = k_n$.

Θεώρημα

Έστω ότι η ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ συγκλίνει στον αριθμό ℓ . Τότε για κάθε υπακολουθία $(a_{k_n})_{n=1}^{\infty}$ ισχύει

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{k_n} = \ell.$$

Παράδειγμα

Να δειχθεί ότι η ακολουθία

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{2n}\right)^n, \quad n \in \mathbb{N},$$

συγκλίνει, και να υπολογισθεί το όριό της.

Παρατηρούμε ότι

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{2n}\right)^n = \left[\left(1 + \frac{1}{2n}\right)^{2n}\right]^{1/2},$$

οπότε σύμφωνα με την Πρόταση 20, θα έχουμε

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{2n}\right)^{2n} = e$$

κατά συνέπεια

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \sqrt{e}.$$

Ορισμός

Θα λέμε ότι η ακολουθία των πραγματικών αριθμών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ **αποκλίνει στο $+\infty$** , και θα γράφουμε $a_n \rightarrow +\infty$ εάν για κάθε πραγματικό αριθμό M , υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ ώστε $a_n \geq M$ για $n \geq N$.

Θα λέμε ότι η ακολουθία των πραγματικών αριθμών $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ **αποκλίνει στο $-\infty$** , και θα γράφουμε $a_n \rightarrow -\infty$ εάν για κάθε πραγματικό αριθμό M , υπάρχει $N \in \mathbb{N}$ ώστε $a_n \leq M$ για $n \geq N$.

Ας θεωρήσουμε μια μη άνω φραγμένη ακολουθία $(a_n)_{n=1}^{\infty}$ πραγματικών αριθμών. Τότε για κάθε $n \in \mathbb{N}$ υπάρχει $k_n \in \mathbb{N}$ με $k_n \geq n$, ώστε

$$a_{k_n} \geq n,$$

κατά συνέπεια $a_{k_n} \rightarrow +\infty$. Όμοια αν μια ακολουθία δεν είναι κάτω φραγμένη τότε υπάρχει υπακολουθία της που αποκλίνει στο $-\infty$. Μπορούμε επομένως να θεωρούμε τα $+\infty$ και $-\infty$ σαν γενικευμένα όρια υπακολουθιών μιας μη φραγμένης ακολουθίας. Μπορεί να αποδειχθεί ότι αν μια ακολουθία είναι φραγμένη τότε υπάρχει υπακολουθία της η οποία συγκλίνει, σε πραγματικό αριθμό.