שיעור 14
אינטגריה של שברים אלגבריים (פונקציות רציונליות)

הגדרה 14.1 פונקציה רציונלית

פונקציה רציונלית (שבר אלגברי) זאת פונקציה מהצורה

$$y = \frac{P(x)}{Q(x)} \ ,$$

כאשר $P(x)$, $Q(x)$ פולינומים.

דוגמה 14.1 פונקציה רציונלית

$f(x) = \dfrac{x^4 - 5x + 9}{x - 2}$ פונקציה רציונלית: $P(x) = x^4 - 5x + 9$ $Q(x) = x - 2$.

הגדרה 14.2 פונקציה רציונלית אמיתי

שבר אלגברי

$$\frac{P(x)}{Q(x)}$$

נקרא אמיתי אם

$$\deg(P) < \deg(Q) \ .$$

אם שבר אלגברי לא אמיתי, יש לעשות חילוק פולינומים.

דוגמה 14.2 חילוק פולינומים

חשבו את האינטגרל

$$\int \frac{x^4 - 5x + 9}{x - 2} \ .$$

פתרון:
שלב ראשון בחישוב אינטגרל של שבר אלגברי לא אמיתי, להגיע לשבר אלגברי אמיתי ע"י חילוק פולינומים. ע"י חילוק ארוך:

שלב 1:

$$x - 2 \overline{\big)\, x^4 \quad - 5x + 9}$$

שלב 2:

$$
\begin{array}{r|lllll}
\multicolumn{1}{r}{} & & x^3 & & & \\
\cline{2-6}
x-2 & x^4 & & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & x^4 & -2x^3 & & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & & -5x & +9
\end{array}
$$

שלב 3:

$$
\begin{array}{r|lllll}
\multicolumn{1}{r}{} & & x^3 & +2x^2 & & \\
\cline{2-6}
x-2 & x^4 & & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & x^4 & -2x^3 & & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & & -5x & +9
\end{array}
$$

שלב 4:

$$
\begin{array}{r|lllll}
\multicolumn{1}{r}{} & & x^3 & +2x^2 & & \\
\cline{2-6}
x-2 & x^4 & & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & x^4 & -2x^3 & & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & -4x^2 & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & & 4x^2 & -5x & +9
\end{array}
$$

שלב 5:

$$
\begin{array}{r|lllll}
\multicolumn{1}{r}{} & & x^3 & +2x^2 & +4x & \\
\cline{2-6}
x-2 & x^4 & & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & x^4 & -2x^3 & & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & & 2x^3 & -10x^2 & & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & & 4x^2 & -5x & +9 \\
\multicolumn{1}{r}{} & & & 4x^2 & -8x & \\
\cline{2-6}
\multicolumn{1}{r}{} & & & & 3x & +9
\end{array}
$$

שלב 6:

$$
\begin{array}{r|llllll}
 & x^3 & +2x^2 & & +4x & +3 \\
\hline
x-2 & x^4 & & & -5x & +9 \\
 & x^4 & -2x^3 & & & \\
\hline
 & & 2x^3 & & -5x & +9 \\
 & & 2x^3 & -10x^2 & & \\
\hline
 & & & 4x^2 & -5x & +9 \\
 & & & 4x^2 & -8x & \\
\hline
 & & & & 3x & +9 \\
 & & & & 3x & -6 \\
\hline
 & & & & & 15
\end{array}
$$

תשובה סופית:

$$\frac{x^4-5x+9}{x-2} = x^3+2x^2+4x+3+\frac{15}{x-2}$$

לכן

$$\int \frac{x^4-5x+9}{x-2} = \int \left(x^3+2x^2+4x+3+\frac{15}{x-2} \right) = \frac{x^4}{4} + \frac{2}{3}x^3 + 2x^2 + 3x + 15\ln|x-2| + C \ .$$

ז"א שלב ראשון בחישוב אינטגרל של שבר אלגברי:

ע"י חילוק ארוך פולינומים להגיע לשבר אלגברי אמיתי. כל שבר אלגברי אמיתי ניתן להציג כסכום של שברים פשוטים. ■

יש 4 סוגים של שברים אלגבריים פשוטים:

שבר אלגברי			שבר פשוט
סוג 1:	$\dfrac{m}{x-a}$		
סוג 2:	$\dfrac{m}{(x-a)^2}$		
	$\dfrac{m}{(x-a)^n}$	$n \in \mathbb{N}\ , \quad n \geq 2$	
סוג 3:	$\dfrac{mx+n}{x^2+px+q}$		כאשר ל- x^2+px+q אין שורשים.
סוג 4:	$\dfrac{mx+b}{(x^2+px+q)^2}$		כאשר ל- x^2+px+q אין שורשים.
	$\dfrac{mx+b}{(x^2+px+q)^n}$	$n \in \mathbb{N}\ , \quad n \geq 2$	כאשר ל- x^2+px+q אין שורשים.

דוגמה 14.3 אינטגרל של פונקציה רציונלית

חשבו את $\displaystyle\int \frac{2x+1}{x^2-3x+1}$

פתרון:

$$\frac{2x+1}{x^2-3x+1} = \frac{2x+1}{(x-1)(x-2)} = \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x-2}$$

$$A(x-2) + B(x-1) = 2x+1$$

$$x = 2 \quad \Rightarrow \quad B = 5$$
$$x = 1 \quad \Rightarrow \quad A = -3$$

$$\int \frac{2x+1}{x^2-3x+1}\,dx = \int \left(\frac{-3}{x-1} + \frac{5}{x-2}\right) dx = -3\ln|x-1| + 5\ln|x-2| + C\ .$$

■

דוגמה 14.4 אינטגרל של פונקציה רציונלית

חשבו את $\int \frac{x^2+4}{(x-2)(x-3)^2}$

פתרון:

$$\frac{x^2+4}{(x-2)(x-3)^2} = \frac{A}{x-2} + \frac{B}{(x-3)^2} + \frac{C}{x-3} \ .$$
$$A(x-3)^2 + B(x-2) + C(x-3)(x-2) = x^2+4$$

$$\begin{aligned} x=3 \quad &\Rightarrow \quad B=13 \\ x=2 \quad &\Rightarrow \quad A=8 \\ x=0 \quad &\Rightarrow \quad 9A-2B+6C=4 \Rightarrow C=-7 \end{aligned}$$

$$\int \frac{x^2+4}{(x-2)(x-3)^2}\,dx = \int \left(\frac{8}{x-2} + \frac{13}{(x-3)^2} - \frac{7}{x-3}\right) dx = 8\ln|x-2| - \frac{13}{x-3} - 7\ln|x-3| + C \ .$$

■

דוגמה 14.5 אינטגרל של פונקציה רציונלית

חשבו את $\int \frac{x^3+1}{x^2(x^2+1)}$

פתרון:

$$\frac{x^3+1}{x^2(x^2+1)} = \frac{A}{x^2} + \frac{B}{x} + \frac{Cx+D}{x^2+1} \ .$$
$$A(x^2+1)^2 + Bx(x^2+1) + (Cx+D)x^2 = x^3+1$$

$$\begin{aligned} x^3: &\quad B+C=1 \\ x^2: &\quad A+D=0 \\ x: &\quad B=0 \\ x^0: &\quad A=1 \end{aligned}$$

לכן

$$D=-1\ , \qquad C=1\ .$$

$$\int \frac{x^3+1}{x^2(x^2+1)}dx = \int \left(\frac{1}{x^2} + \frac{x-1}{x^2+1}\right) dx = \int \left(\frac{1}{x^2} + \frac{x}{x^2+1} - \frac{1}{x^2+1}\right) dx = -\frac{1}{x} + \frac{1}{2}\ln|x^2+1| - \arctan(x) + C\ .$$

■

דוגמה 14.6 אינטגרל של פונקציה רציונלית

חשבו את $I = \int \frac{2x^2-3x-3}{(x-1)(x^2-2x+5)}$

פתרון:

$$\frac{2x^2-3x-3}{(x-1)(x^2-2x+5)} = \frac{A}{x-1} + \frac{Bx+C}{x^2-2x+5} \ .$$
$$A(x^2-2x+5)+(Bx+C)(x-1) = 2x^2-3x-3$$

$$\begin{aligned} x^2: &\quad A+B=2 \\ x: &\quad -2A+C-B=-3 \\ x^0: &\quad 5A-C=-3 \end{aligned}$$

לכן

$$A=-1 \ , \qquad B=3 \ , \qquad C=-2 \ .$$

$$I = \int \frac{2x^2-3x-3}{(x-1)(x^2-2x+5)}dx = \int \left(-\frac{1}{x-1} + \frac{3x-2}{x^2-2x+5}\right)dx = -\ln|x-1| + \int \left(\frac{3x-2}{(x-1)^2+4}\right)dx \ .$$

נגדיר $u=x-1$:

$$\begin{aligned} I &= \ln|x-1| + \int \frac{3(u+1)-2}{u^2+4}du \\ &= \ln|x-1| + \int \frac{3(u+1)-2}{u^2+4}du \\ &= \ln|x-1| + 3\int \frac{u}{u^2+4}du - \int \frac{1}{u^2+4}du \\ &= \ln|x-1| + \frac{3}{2}\ln|u^2+4| - \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{u}{2}\right) \\ &= \ln|x-1| + \frac{3}{2}\ln|(x-1)^2+4| - \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{x-1}{2}\right) \end{aligned}$$

■

למה 14.1 שלבים באינטגרציה של שברים אלגבריים

<u>שלב 1.</u> לחלק במכנה (חילוק פולינומי) במידה ש $\deg(P) \geq \deg(Q)$.

<u>שלב 2.</u> להציב שבר אלגברי אמיתי כסכום של שברים פשוטים.

<u>שלב 3.</u> לבצע אינטגרציה של כל שבר פשוט.

דוגמה 14.7 אינטגרל של פונקציה רציונלית

חשבו את $I = \int \frac{x^5+2x^3+4x+4}{x^4+2x^3+2x^2}\,dx$

פתרון:

שלב 1:

$$x^4+2x^3+2x^2\overline{)\,x^5\ \ +2x^3\ \ +4x+4}$$

שלב 2:

$$\begin{array}{r|l} & \qquad\qquad\qquad\quad x \\ \hline x^4+2x^3+2x^2 & x^5 \qquad\quad +2x^3\ \ +4x+4 \\ & \underline{x^5+2x^4+2x^3 \qquad\qquad\quad} \\ & \quad -2x^4 \qquad\qquad +4x+4 \end{array}$$

שלב 3:

$$\begin{array}{r|l} & \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad x-2 \\ \hline x^4+2x^3+2x^2 & x^5 \qquad\quad +2x^3 \qquad\qquad +4x+4 \\ & \underline{x^5+2x^4+2x^3 \qquad\qquad\qquad\quad} \\ & \quad -2x^4 \qquad\qquad\qquad\quad +4x+4 \\ & \underline{\quad -2x^4-4x^3-4x^2 \qquad\qquad} \\ & \qquad\qquad 4x^3+4x^2+4x+4 \end{array}$$

לכן ע"י חילוק ארוך קיבלנו

$$\frac{x^5+2x+4x+4}{x^4+x^3+2x^2}=x-2+\frac{4x^3+4x^2+4x+4}{x^4+2x^3+2x^2}=x-2+4\left(\frac{x^3+x^2+x+1}{x^4+2x^3+2x^2}\right)$$

$$\frac{x^3+x^2+x+1}{x^4+2x^3+2x^2}=\frac{x^3+x^2+x+1}{x^2(x^2+2x+2)}=\frac{A}{x^2}+\frac{B}{x}+\frac{Cx+D}{x^2+2x+2}$$

$$A(x^2+2x+2)+Bx(x^2+2x+2x)+(Cx+D)x^2=x^3+x^2+x+1$$

$$\begin{array}{ll} x^3: & B+C=1 \\ x^2: & 2A+2B+D=1 \\ x: & 2A+2B=1 \\ x^0: & 2A=1 \end{array}$$

לכן

$$A=\frac{1}{2}\ , \qquad B=0\ , \qquad C=1\ , \qquad D=\frac{1}{2}\ .$$

$$
\begin{aligned}
I &= \int \left(x - 2 + \frac{2}{x^2} + \frac{4x+2}{x^2+2x+2} \right) dx \\
&= \int \left(x - 2 + \frac{2}{x^2} + \frac{4x+2}{(x+1)^2+1} \right) dx \\
&= \frac{x^2}{2} - 2x - \frac{2}{x} + 4 \int \frac{x+\frac{1}{2}}{(x+1)^2+1} dx \ .
\end{aligned}
$$

נגדיר $u = x + 1$:

$$
\begin{aligned}
I &= \frac{x^2}{2} - 2x - \frac{2}{x} + 4 \int \frac{u - \frac{1}{2}}{u^2+1} du \\
&= \frac{x^2}{2} - 2x - \frac{2}{x} + 2 \ln |u^2+1| - 2 \arctan(u) + C \\
&= \frac{x^2}{2} - 2x - \frac{2}{x} + 2 \ln |(x+1)^2+1| - 2 \arctan(x+1) + C
\end{aligned}
$$

■