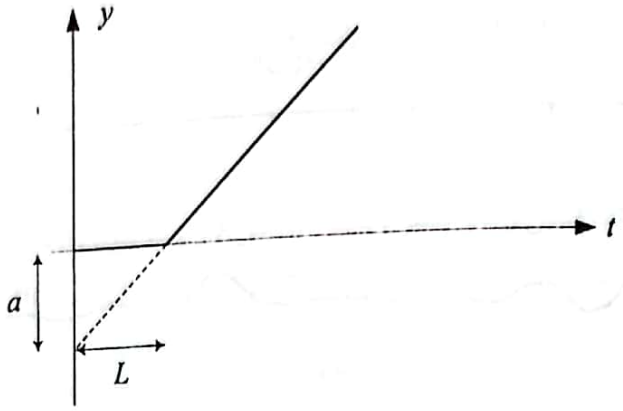
۶-۵ روش زیگلر-نیکولز و سایر روشهای مرتبط

روشهای کلاسیک تنظیم پارامترهای جبرانساز PID اولین بار در سال ۱۹۴۲ مشترکاً توسط سه نفر به نامهای زیگلر (Ziegler)، *نیکولز* (Nichols) و *رُچِستر* (Rochester) ارائه شدند [1] [18]. این روشها، که امروزه به روشهای زیگلر-نیکولز معروفند، هنوز هم به همان شکل اولیه یا با کمی تغییر به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک حسن بزرگ این روشها آن است که با استفاده از اطلاعات کم و نسبتاً ساده‌ای از فرایند، ضرایب مناسب برای جبرانساز PID را به دست می‌دهند. زیگلر و نیکولز دو روش را برای طراحی کنترل کننده ارائه کرده‌اند که یکی از آنها مبتنی بر پاسخ پلهٔ فرایند و دیگری مبتنی بر اطلاعات فرکانسی آن است. در ادامه این دو روش را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱- این مقالهٔ با ارزش تاریخی در CD ضمیمهٔ کتاب با عنوان znr.pdf موجود است.

۶-۵-۱ روش پاسخ پلهٔ زیگلر-نیکولز

اولین روش ارائه شده توسط زیگلر و نیکولز از پاسخ پلهٔ فرایند برای به دست آوردن ضرایب جبرانساز PID استفاده می‌کند. در این روش ابتدا پاسخ پلهٔ فرایند را رسم می‌کنیم و سپس پارامترهای a و L را مطابق شکل ۶-۳ به دست می‌آوریم. برای به دست آوردن این دو پارامتر ابتدا باید خطی را که با بیشترین شیبِ ممکن بر پاسخ پلهٔ فرایند مماس است (در فرایندهای پایدار) یا مجانب پاسخ پلهٔ فرایند (در فرایندهای انتگرال دار) را مطابق شکل ۶-۳ رسم کنیم. پارامترهای a و L از تلاقی این خط به ترتیب با محورهای y و t به دست می‌آیند. توجه کنید که در این روش لازم نیست پاسخ پلهٔ فرایند حتماً S-شکل باشد.



شکل ۶-۳ تعیین پارامترهای a و L با استفاده از پاسخ پلهٔ فرایند در روش پاسخ پلهٔ زیگلر-نیکولز

پس از تعیین مقادیر پارامترهای a و L، برای تعیین ضرایب کنترل کننده ابتدا باید نوع کنترل کننده‌ای را که قصد استفاده از آن را داریم معلوم کنیم. پس از انتخاب نوع کنترل کننده، ضرایب آن از جدول ۶-۱ به دست می‌آیند. توجه کنید که پاسخ پلهٔ سیستم حلقه بسته‌ای که کنترل کنندهٔ آن از این روش محاسبه شده باشد معمولاً از نوع میرای ضعیف خواهد بود. پارامتر T_p در جدول ۶-۱ پریود تقریبی این نوسانات میرا شونده را به دست می‌دهد. در ادامه، در مورد نحوهٔ محاسبهٔ این ضرایب بیشتر صحبت خواهیم کرد.

جدول ۶-۱ ضرایب جبرانساز PID در طراحی به روش پاسخ پلهٔ زیگلر-نیکولز

نوع جبرانساز	K	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4L$
PI	$0.8/a$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

مثال ۶-۱

می‌خواهیم با استفاده از روش پاسخ پلهٔ زیگلر-نیکولز برای فرایندی با تابع تبدیل

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \qquad (۶-۲۲)$$

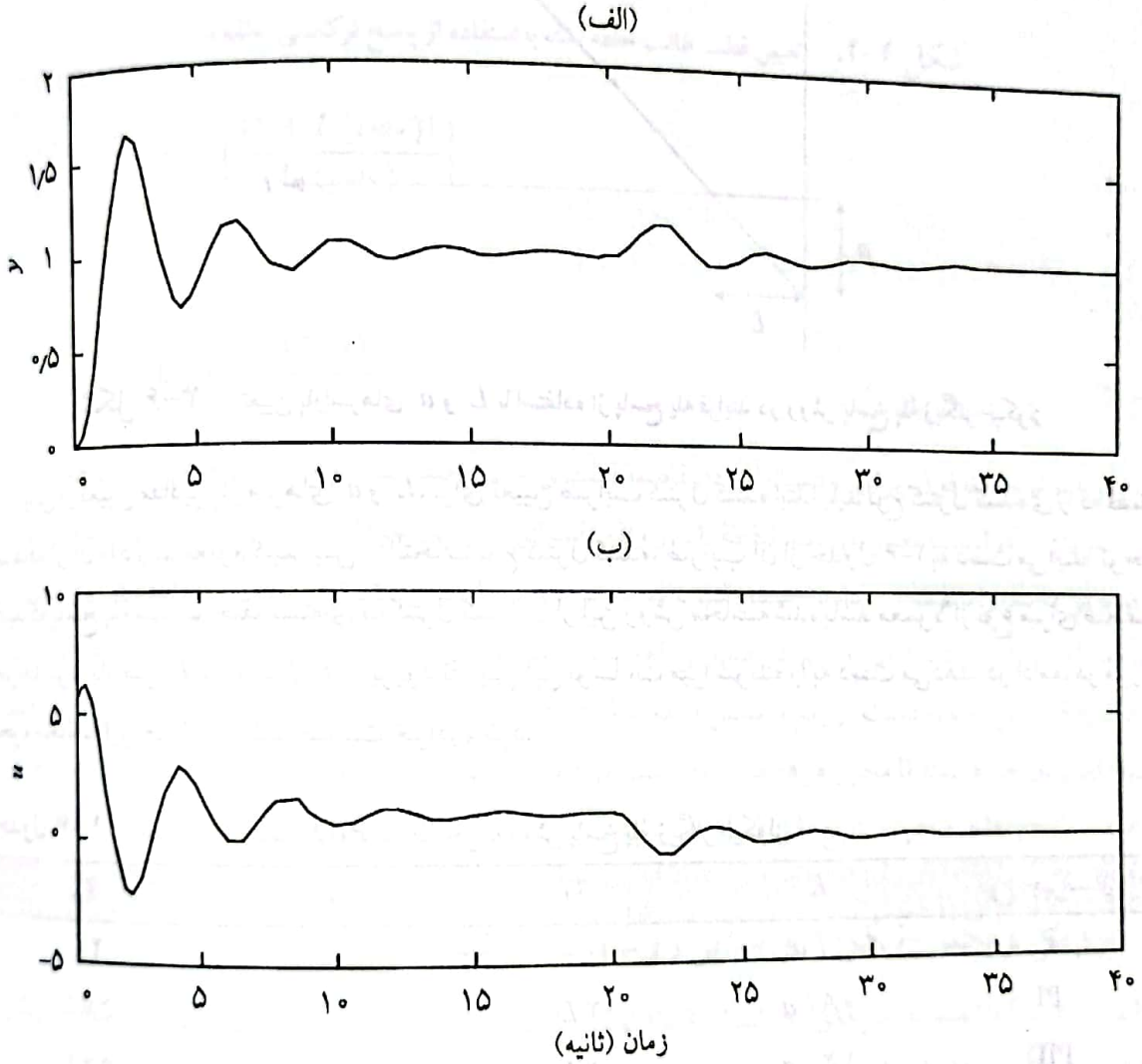
یک جبرانساز PID طراحی کنیم. پس از رسم پاسخ پلهٔ فرایند، پارامترهای a و L به ترتیب برابر با $a = 0.218$ و

$L = ۰/۸۰۶$ به دست می‌آیند. با استفاده از جدول ۶-۱ می‌توان دید که ضرایب جبرانساز PID عبارتند از

$$K = ۵/۵۰ , \quad T_i = ۱/۶۱ , \quad T_d = ۰/۴۰۳$$

(۶-۲۳)

پاسخ پلهٔ سیستم حلقه بسته و سیگنال کنترل به ترتیب در شکلهای ۶-۴ (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند. در این شکل یک اغتشاش پله در ثانیهٔ ۲۰ام به ورودی فرایند اعمال می‌شود. همانطور که می‌بینیم خطای سیستم به ورودی پله به طور تقریبی با نسبت افت ۱/۴ افت می‌کند (این نسبت برای اغتشاش پله‌ای بار کمتر است). همچنین پاسخ پلهٔ سیستم دارای فراجهش نسبتاً زیادی است که با استفاده از کنترل کنندهٔ دو درجه آزادی (یعنی با کاهش پارامتر b) می‌توان آن را بهبود داد.



شکل ۶-۴ مربوط به مثال ۶-۱، (الف) خروجی، (ب) کنترل

۶-۵-۲ روش پاسخ فرکانسی زیگلر-نیکولز

در این روش، طراحی کنترل‌کننده بر پایهٔ اطلاعات ما از نقطهٔ غائی فرایند (یعنی نقطه‌ای که در آن نمودار نایکوئیست تابع تبدیل فرایند قسمت منفی محور حقیقی را قطع می‌کند) انجام می‌گیرد. بنا به دلایل تاریخی این نقطه را با دو پارامتر K_u (بهرهٔ غائی) و T_u (پریود غائی) مشخص می‌کنند که قبلاً در فصل ۳ (بخش ۳-۷) با نحوهٔ به دست آوردن آنها آشنا شدیم. پس از تعیین پارامترهای K_u و T_u، ضرایب کنترل‌کننده را از جدول ۶-۲ به دست می‌آوریم. همانند

روش پاسخ پله، در اینجا نیز پاسخ پلهٔ سیستم حلقه بسته معمولاً از نوع میرای ضعیف است. ستون T_p در جدول ۶-۲ پریود این نوسانات میرا شونده را به طور تقریبی به دست می‌دهد.

جدول ۶-۲ ضرایب جبرانساز PID در طراحی به روش پاسخ فرکانسی زیگلر-نیکولز

نوع جبرانساز	K	T_i	T_d	T_p
P	$۰/۵\,K_u$			T_u
PI	$۰/۴\,K_u$	$۰/۸\,T_u$		$۱/۴\,T_u$
PID	$۰/۶\,T_u$	$۰/۵\,T_u$	$۰/۱۲۵\,T_u$	$۰/۸۵\,T_u$

مثال زیر نحوهٔ طراحی جبرانساز PID را به روش پاسخ فرکانسی زیگلر-نیکولز نشان می‌دهد.

مثال ۶-۲

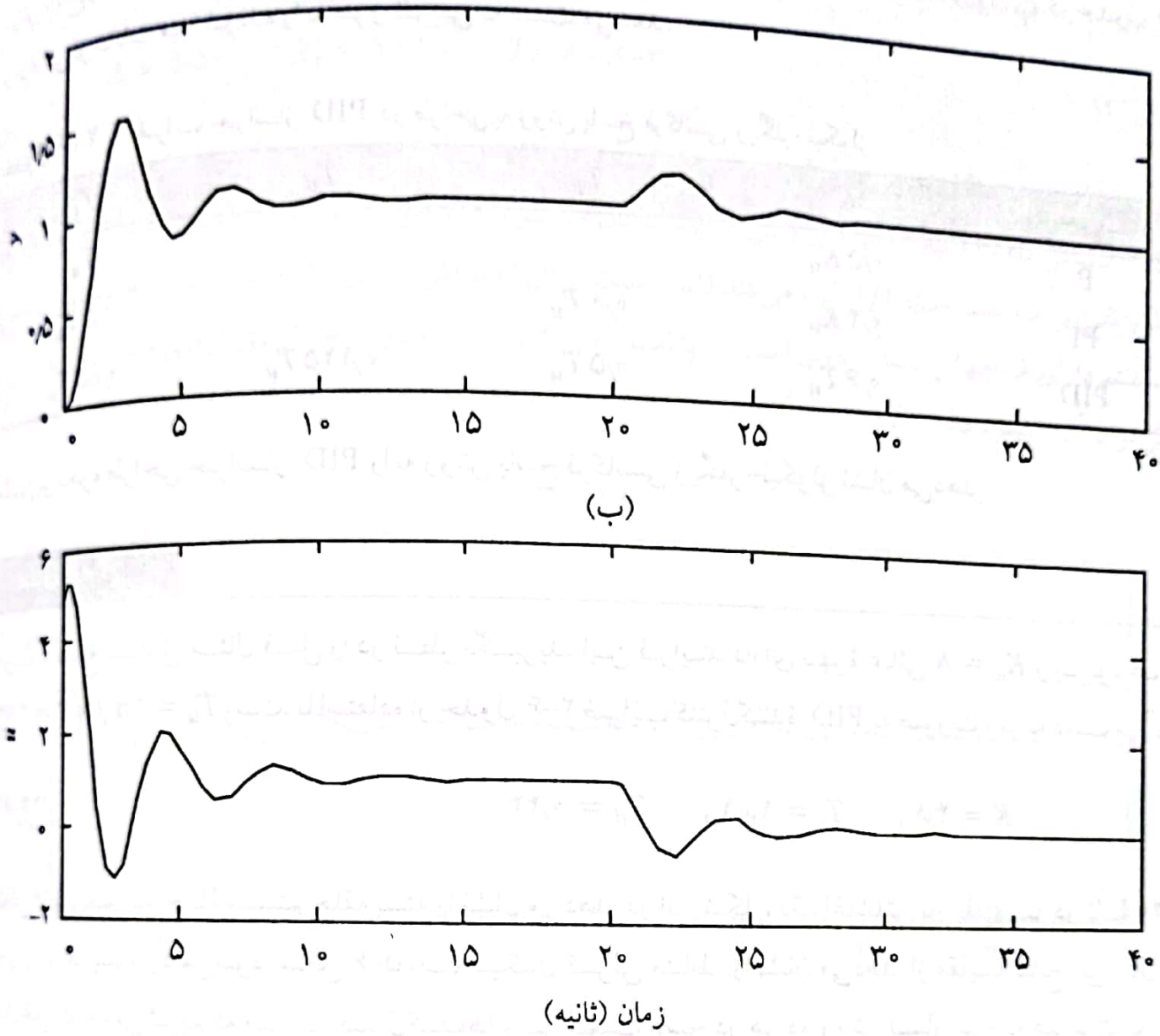
دوباره تابع تبدیل مثال قبل را در نظر بگیرید. این فرایند دارای بهرهٔ غائی $K_u = ۸$ و پریود غائی $T_u = ۲\pi/\sqrt{۳} \approx ۳/۶۳$ است. با استفاده از جدول ۶-۲ ضرایب کنترل‌کنندهٔ PID به صورت زیر به دست می‌آیند

$$K = ۴/۸, \quad T_i = ۱/۸۱, \quad T_d = ۰/۴۴ \tag{۲۴-۶}$$

شکل ۶-۵(الف) پاسخ پلهٔ سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد. در این شکل، یک اغتشاش بار پله‌ای نیز در ثانیهٔ ۲۰ام به ورودی فرایند وارد می‌شود. شکل ۶-۵ (ب) سیگنال کنترلی متناظر را نشان می‌دهد. از مقایسهٔ نتایج این مثال با مثال قبل متوجه می‌شویم که ضرایب کنترل‌کننده‌ها و نیز کیفیت پاسخ در هر دو روش بسیار شبیه به هم است. با این حال در روش فرکانسی، میرایی نوسانات کمی سریعتر می‌باشد.

در سیستمهای کنترلی اولیه، مهمترین هدف از انجام کنترل، دفع اغتشاش بود و دنبال‌کنندگی سیگنال مرجع در اولویت دوم قرار داشت. به همین دلیل، روشهای زیگلر-نیکولز نیز با هدف ایجاد پاسخ مناسب به اغتشاشات بار طراحی شده بودند. زیگلر و نیکولز برای رسیدن به یک قانون مناسب برای تنظیم ضرایب جبرانساز، شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات بسیاری را بر روی سیستمهای گوناگون انجام دادند. ایدهٔ اصلی در پشت همهٔ این تلاشها رسیدن به نسبت افت خطای ۱/۴ در دفع اغتشاش بود[1]. در واقع زیگلر و نیکولز به طور تجربی و با مشاهدهٔ رفتار سیستمهای مختلف سعی کردند ضرایب کنترل کننده را به گونه‌ای انتخاب کنند که نسبت ماکزیمم افت خطای ناشی از اغتشاش در هر پریود برابر با ۱/۴ باشد. توجه کنید که نسبت افت $d = ۱/۴$ متناظر با نسبت میرایی $\zeta = ۰/۲۲$ است که این نسبت میرایی برای اکثر کاربردها بسیار بزرگ می‌باشد (یعنی پاسخ با سرعت کافی میرا نمی‌شود). به همین دلیل کنترل‌کننده‌هایی که با استفاده از روشهای زیگلر-نیکولز طراحی می‌شوند معمولاً نیاز به اصلاح و تنظیم مجدد به منظور افزایش میرایی سیستم دارند. برای این منظور می‌توان با وزن‌دهی سیگنال مرجع کاری کرد که پاسخ سیستم به ورودی مبنا رضایت‌بخش باشد. توجه داشته باشید که در این حالت وزن‌دهی سیگنال مرجع باید با دقت بسیار انجام شود.

۱- گاهی به همین دلیل این روش را «معیار افت ۱/۴» نیز می‌نامند.



شکل ۶-۵ مربوط به مثال ۶-۲، (الف) خروجی، (ب) کنترل