تحلیل ساختاری سه اثر برجسته تویو ایتو (Toyo Ito)

مقدمه

تویو ایتو (متولد 1941) یکی از برجسته‌ترین معماران ژاپنی معاصر و برنده جایزه پریتزکر 2013 است. او با رویکردی نوآورانه به سیستم‌های سازه‌ای و ادغام فناوری با فضای معماری شناخته شده است.

1️⃣ سندای مدیاتک (Sendai Mediatheque)

اطلاعات کلی

- **موقعیت**: سندای، میاگی، ژاپن
- **سال طراحی**: 1995
- **سال تکمیل**: 2001
- **ابعاد**: 50m × 50m × 36.5m (ارتفاع)
- **تعداد طبقات**: 7 طبقه
- **مساحت**: 21,682 مترمربع
- **مهندس سازه**: Sasaki Structural Consultants

تصویر: سندای مدیاتک با نمای شیشه‌ای شفاف و ستون‌های شبکه‌ای قابل رویت - نمای خارجی ساختمان Sendai Mediatheque

تحلیل سیستم سازه‌ای

1. مفهوم سازه‌ای: سه عنصر اصلی

ساختار سندای مدیاتک بر اساس سه عنصر اصلی طراحی شده است:

الف) صفحات (Plates) - دال‌های طبقات - 7 دال فولادی به ضخامت 40 سانتی‌متر (15.75 اینچ) - سیستم ساختاری: شبکه لانه زنبوری (Honeycomb) از مقاطع فولادی پر شده با بتن سبک - دهانه آزاد: 50 متر در هر جهت - این دال‌ها بدون تیر میانی به ستون‌ها متصل می‌شوند - سیستم لانه زنبوری باعث کاهش وزن و افزایش مقاومت خمشی شده است

ب) لوله‌ها (Tubes) - ستون‌های شبکه‌ای - تعداد: 13 عدد ستون شبکه‌ای فولادی - قطر لوله‌های تشکیل‌دهنده: از 18 تا 76 سانتی‌متر (7 تا 30 اینچ) - جنس: فولاد با دیواره ضخیم - ساختار: ساخته شده از بخش‌های طبقه به طبقه که به صورت متوالی مونتاژ شده‌اند - چهار لوله نزدیک به گوشه‌های ساختمان برای مقاومت در برابر زلزله 400 ساله طراحی شده‌اند - سایر لوله‌ها بارهای ثقلی عمودی را تحمل می‌کنند - این لوله‌ها علاوه بر عملکرد سازه‌ای، حاوی تاسیسات عمودی (هوا، آب، برق، نور و پله‌ها) هستند

ج) پوسته (Skin) - نمای ساختمان - نمای جنوبی: شیشه دوجداره (Double-glazed) - عملکرد: بخشی از سیستم کنترل آب و هوای ساختمان - مواد: شیشه، پانل‌های فولادی، و مش آلومینیومی

2. عملکرد لرزه‌ای

- ساختمان در زلزله مارس 2011 (زلزله بزرگ توهوکو با قدرت 9.0 ریشتر) تقریباً بدون خسارت باقی ماند
- طراحی سازه‌ای با 13 ستون شبکه‌ای انعطاف‌پذیری و مقاومت لرزه‌ای بالایی دارد

پلان (Plan)

```
پلان نوع (Typical Floor Plan):

      ╔═══════════════════════════════════════╗
      ║  50m × 50m - فضای آزاد و باز          ║
      ║                                       ║
      ║   ○       ○       ○       ○       ○   ║  ○ = ستون شبکه‌ای
      ║                                       ║     (Tube)
      ║                                       ║
      ║   ○       ○    [هسته     ○       ○    ║
      ║                تاسیسات]               ║
      ║                                       ║
      ║   ○       ○       ○       ○       ○   ║
      ║                                       ║
      ║                                       ║
      ║                                       ║
      ║  [نمای شیشه‌ای دوجداره - طرف جنوب]    ║
      ╚═══════════════════════════════════════╝

توضیحات پلان:
- ستون شبکه‌ای با چیدمان نامنظم ولی محاسبه شده 13
- فضای کاملاً آزاد بین ستون‌ها (Column-free space)
- انعطاف‌پذیری بالا برای تغییر کاربری طبقات
- هسته تاسیساتی در سمت شمالی
```

مقطع (Section)

```
مقطع عمودی:

                          سقف ═══════════════════
36.5m                        /  \          /  \
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     7 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     6 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     5 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     4 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     3 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     2 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 │     1 طبقه      ══════│═══════════════════════│══════
 │                       │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
 └     طبقه همکف ══════│═══════════════════════│══════
                         │▓│      │▓│     │▓│      │▓│
                       ═══════════════════════════════════

▓ = ستون شبکه‌ای (Tube)
= = دال طبقات (Plate)

توضیحات مقطع:
- دال‌های 40 سانتی‌متری به صورت شناور بین ستون‌ها
- ستون‌های شبکه‌ای از کف تا سقف به صورت یکپارچه
- ارتفاع آزاد هر طبقه متغیر است
```

نما (Elevation)

```
نمای جنوبی (Main Facade):

┌──────────────────────────────────────┐
│ ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓ │ 7F
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 6F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 5F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 4F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 3F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 2F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
├──────────────────────────────────────┤
│ ▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒ │ 1F
│ ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  ▒  ○  │
└──────────────────────────────────────┘

▒ = نمای شیشه‌ای دوجداره (Double-glazed facade)
○ = ستون‌های شبکه‌ای قابل رویت از بیرون
▓ = پانل‌های مات و مش آلومینیومی

توضیحات نما:
- شفافیت کامل در طبقات میانی
- امکان دیدن ستون‌های شبکه‌ای از بیرون
- نمای پویا و سیال
```

نوآوری‌های سازه‌ای

1. **حذف ستون‌های منظم**: استفاده از 13 ستون شبکه‌ای به جای صدها ستون معمولی
2. **چندکارکردی بودن**: ستون‌ها هم‌زمان عملکرد سازه‌ای و تاسیساتی دارند
3. **انعطاف‌پذیری**: فضاهای کاملاً آزاد و قابل تغییر
4. **مقاومت لرزه‌ای بالا**: عملکرد عالی در زلزله 2011

2️⃣ اپرا هاوس تایچونگ (Taichung Metropolitan Opera House)

اطلاعات کلی

- **موقعیت**: تایچونگ، تایوان
- **سال طراحی**: 2005
- **سال تکمیل**: 2016
- **مساحت**: 57,685 مترمربع
- **مهندس سازه**: Arup
- **مفهوم طراحی**: "صدای غار" (Sound Cave)

تصویر: اپرا هاوس تایچونگ با معماری منحنی و ارگانیک - نمای خارجی Taichung Metropolitan Opera House

تحلیل سیستم سازه‌ای

1. مفهوم سازه‌ای: "سازه بدون ستون با دیوارهای منحنی"

این ساختمان یکی از پیچیده‌ترین سازه‌های جهان است که با استفاده از فناوری BIM و روش‌های ساخت نوین ساخته شده است.

الف) دیوارهای منحنی (Curved Walls) - تعداد: 58 واحد دیواری منحنی - ضخامت: متغیر از 50 تا 120 سانتی‌متر - جنس: بتن مسلح با کیفیت بالا - عملکرد: باربر سازه‌ای اصلی - هندسه: سطوح دوبار منحنی (Double-curved surfaces) - این دیوارها به صورت یکپارچه از کف تا سقف ادامه دارند

ب) کف‌های تو در تو (Interlocking Floors) - سیستم: دال‌های بتنی با هندسه منحنی - اتصال: به دیوارهای منحنی به صورت یکپارچه - عملکرد: توزیع بار و ایجاد صلبیت افقی

ج) دیوارهای داخلی و خارجی تو در تو - دو پوسته داخلی و خارجی - فضای بین دو پوسته: تاسیسات و عایق‌کاری - یکپارچگی سازه‌ای کامل

2. فناوری ساخت

- **قالب‌بندی**: استفاده از قالب‌های CNC برای ساخت سطوح منحنی

- **BIM**: تمامی طراحی و ساخت با نرم‌افزار مدل‌سازی اطلاعات ساختمان
- **کنترل کیفیت**: اسکن سه‌بعدی لیزری در حین ساخت
- **نوآوری**: اولین ساخت این نوع سازه در صنعت ساختمان تایوان

3. چالش‌های سازه‌ای

1. محاسبه و آنالیز سازه‌ای سطوح دوبار منحنی
2. توزیع غیریکنواخت نیرو در دیوارهای منحنی
3. طراحی لرزه‌ای برای هندسه پیچیده
4. ساخت و قالب‌بندی سطوح منحنی با دقت بالا

پلان (Plan)

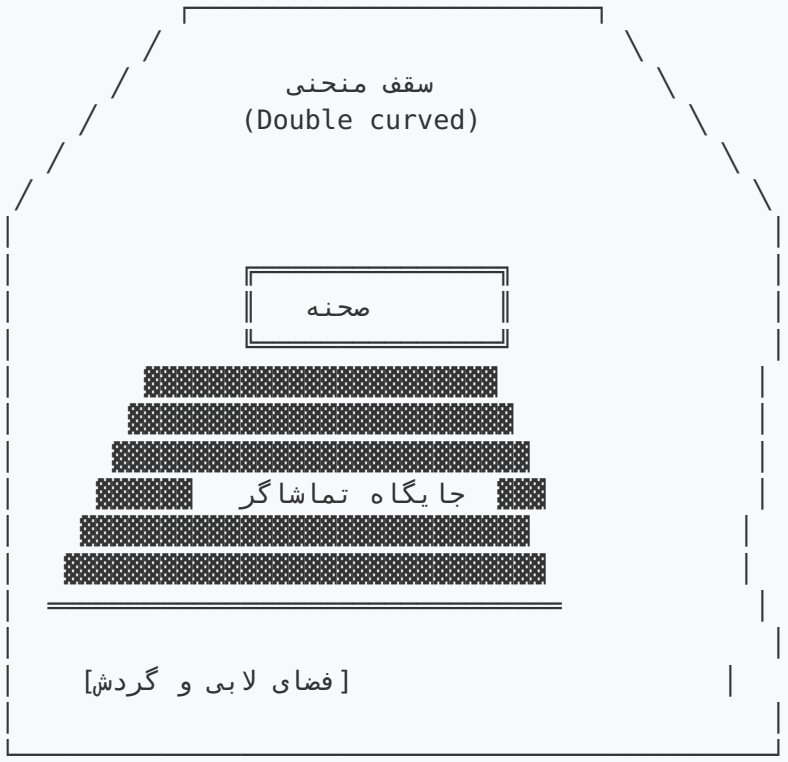
```
پلان طبقه همکف:

        ╔═══════════════════════════════════════╗
        ‖                                       ‖
        ‖      /\        /────\       /\       ‖
        ‖     /  \      /      \     /  \      ‖
        ‖    | سالن |  |   سالن  |   | سالن |  ‖
        ‖    | 2000 |   | کوچک | |    اصلی|    ‖
   200  | |    2007  |   | نفره |   ‖ ورودی |  ‖
   ═══>‖    \    /     \ نفره  \   /  نفره/   ‖
        ‖     \/        \────/      \/         ‖
        ‖                                       ‖
        ‖   ┌──────┐                ┌──────┐   ‖
        ‖   |فضای|          \/   | لابی و |   ‖
        ‖   |عمومی|         \  /  | ورودی |   ‖
        ‖   └──────┘ | کافه|        └──────┘   ‖
        ‖             \ /                      ‖
        ‖              \/                      ‖
        ╚═══════════════════════════════════════╝

توضیحات پلان:
- هر شکل منحنی نشان‌دهنده سالن‌های اپرا با دیوارهای منحنی است
- فضاها به صورت ارگانیک و پیوسته به هم متصل هستند
- بدون ستون داخلی
- گردش عمومی در فضای بین سالن‌ها
```

مقطع (Section)

مقطع عمودی از سالن اصلی:



دیوارهای منحنی بتنی (58 واحد)

▓ = جایگاه تماشاگران
| = دیوارهای منحنی بتنی (Curved concrete walls)

توضیحات مقطع:
- دیوارها و سقف به صورت یکپارچه و منحنی
- آکوستیک بهینه شده توسط شکل منحنی
- بدون ستون در داخل سالن

نما (Elevation)

```
نمای خارجی (جانبی):

    ┌──────────────────────────────────────────────┐
    │     ╱╲        ╱╲        ╱╲        ╱╲         │
    │   ╱    ╲    ╱    ╲    ╱    ╲    ╱    ╲       │
    │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │      │
    │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │      │
    │   ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱       │
    │     ||        ||        ||        ||          │
    │     ||        ||        ||        ||          │
    │   ╱    ╲    ╱    ╲    ╱    ╲    ╱    ╲       │
    │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │      │
    │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │  │ ▒▒▒▒ │      │
    │   ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱    ╲▒▒▒▒╱       │
    │     ||        ||        ||        ||          │
    └────╩╩────────╩╩────────╩╩────────╩╩────────────┘

▒ = بازشوهای منحنی (Curved openings)
| = دیوارهای بتنی

توضیحات نما:
- بازشوهای منحنی ارگانیک
- پوسته بتنی با پنجره‌های نامنظم
- ظاهر غارمانند و طبیعی
```

نوآوری‌های سازه‌ای

1. **اولین سازه از نوع خود**: هیچ ساختمانی با این سیستم سازه‌ای قبلاً ساخته نشده بود
2. **محاسبات پیچیده**: استفاده از FEM برای تحلیل سازه‌ای
3. **ساخت دقیق**: تلرانس کمتر از 5 میلی‌متر در ساخت
4. **یکپارچگی**: سازه و معماری کاملاً یکپارچه هستند

3️⃣ ساختمان تودز اوموتساندو (TOD'S Omotesando Building)

اطلاعات کلی

- **موقعیت**: شیبویا، توکیو، ژاپن
- **سال طراحی**: 2002
- **سال تکمیل**: 2004
- **تعداد طبقات**: 7 طبقه
- **ارتفاع**: حدود 21 متر
- **عرض نما**: 28 متر
- **مهندس سازه**: Sasaki Structural Consultants
- **مفهوم طراحی**: "درخت زلکوا" (Zelkova Tree)

تصویر: ساختمان تودز با نمای بتنی الگودار به شکل شاخه‌های درخت - نمای خارجی با الگوی درختی TOD'S Omotesando Building

تحلیل سیستم سازه‌ای

1. مفهوم سازه‌ای: "نما به عنوان سازه"

این ساختمان یک نوآوری بنیادین در طراحی سازه‌ای است: نمای خارجی خود سازه اصلی ساختمان است.

الف) دیوار سازه‌ای نمایی (Facade as Structure) - ضخامت: 30 سانتی‌متر (300 میلی‌متر) - جنس: بتن مسلح با مقاومت بالا - الگو: سیلوئت 9 درخت زلکوا که به هم تابیده شده‌اند - تعداد بازشوها: 270 بازشوی منحصر به فرد - عملکرد: تحمل کلیه بارهای عمودی و جانبی

ب) دال‌های طبقات (Floor Slabs) - ضخامت: 50 سانتی‌متر (20 اینچ) - دهانه: 10 تا 15 متر - عملکرد: انتقال تمامی بارهای داخلی به دیوارهای خارجی - بدون ستون داخلی: فضای 7 طبقه کاملاً آزاد از ستون

ج) سیستم پایه (Foundation System) - نوع: پی جداساز لرزه‌ای (Seismic Isolation) - عملکرد: جذب شوک زلزله - رایج در ژاپن برای ساختمان‌های مهم

2. تحلیل جریان نیرو (Force Flow)

مفهوم طراحی این بود که «سطحی ایجاد شود که به عنوان سازه عمل کند و مستقیماً جریان نیرو را نشان دهد»:

1. **بارهای عمودی**:
2. از دال‌ها به دیوار نمایی منتقل می‌شوند
3. در الگوی درختی به سمت پایین جریان می‌یابند
4. بیشترین ضخامت دیوار در نقاط با تنش بالا است
5. **بارهای جانبی (باد و زلزله)**:
6. دیوار نمایی مانند دیوار برشی عمل می‌کند
7. الگوی درختی باعث توزیع یکنواخت تنش می‌شود
8. بازشوها در نقاط کم تنش قرار دارند
9. **بهینه‌سازی**:
10. الگوی درختی با شبیه‌سازی کامپیوتری بهینه شده است
11. هر بازشو در محل مناسب خود قرار دارد
12. حداقل وزن با حداکثر مقاومت

3. چالش‌های طراحی و ساخت

1. **تحلیل سازه‌ای**: محاسبه دقیق توزیع تنش در هندسه پیچیده
2. **قالب‌بندی**: ساخت 270 بازشوی منحصر به فرد
3. **آرماتور**: آرماتوربندی پیچیده برای پیروی از الگوی نیرو
4. **کنترل کیفیت**: اطمینان از یکپارچگی بتن در نقاط حساس

پلان (Plan)

```
پلان نوع (Typical Floor Plan):

                      28m
     ╔═══════════════════════════════════╗
     ╫▓▓▓                               ▓▓▓╫
     ╫▓▓   ┌─────────────────────────┐   ▓▓╫
     ╫▓▓   │                         │   ▓▓╫
     ╫▓▓   │                         │   ▓▓╫
     ╫     │                         │   ▓▓╫
     ╫▓▓   │   فضای آزاد بدون ستون   │     ╫
     ╫     │                         │   ▓▓╫
     ╫▓▓   │   (Column-free space)   │   ▓▓╫
     ╫     │                         │     ╫
     ╫▓▓   │                         │   ▓▓╫
12m  ╫     │                         │ [هسته ╫
     ╫▓▓   │                         │ تاسیسات]
     ╫     │                         │   ▓▓╫
     ╫▓▓   └─────────────────────────┘   ▓▓╫
     ╫▓▓▓                               ▓▓▓╫
     ╚═══════════════════════════════════╝
            اوموتساندو (خیابان اصلی)

▓ = دیوار سازه‌ای با الگوی درختی (ضخامت 300mm)

توضیحات پلان:
- دیوارهای محیطی به ضخامت 30 سانتی‌متر
- فضای داخلی کاملاً آزاد (No columns)
- هسته تاسیساتی در عقب ساختمان
- الگوی درختی در دیوارهای محیطی
```

مقطع (Section)

```
مقطع عمودی:

                          ═══════════════════════ سقف
                         ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
21m    7 طبقه           ▓│                    │▓
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  │    6 طبقه           ▓│    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │▓
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  │    5 طبقه            │    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │▓
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  │    4 طبقه           ▓│    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  │    3 طبقه            │    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │▓
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  │    2 طبقه           ▓│    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │▓
  │                     ═══════════════════════
  │                     ▓│▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒│▓
  └    1 طبقه           ▓│    ▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓    │▓
                        ═══════════════════════
                        ┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻┻
                        پی جداساز لرزه‌ای

▓ = دیوار سازه‌ای نمایی (30cm)
▒ = شیشه در بازشوهای نما
▓ = فضای داخلی
= = دال طبقات (50cm)

توضیحات مقطع:
- دال‌های 50 سانتی‌متری
- دیوار نمایی از پی تا سقف
- بازشوهای نامنظم ولی محاسبه شده
```

نما (Elevation)

```
نمای خیابان اوموتساندو (Main Facade):

     ╔═══════════════════════════════════════╗
     ╫▓▓▓▓▓▓\       /▓▓▓▓\     /▓▓▓▓▓▓\     /▓▓▓▓╫
     ╫▓▓▓▓▓▓▓\     /▓▓▓▓▓▓▓\   /▓▓▓▓▓▓▓▓\   /▓▓▓▓▓╫ 7F
     ╫▓▓▓▓▒▒▒▒\   /▒▒▒▒▓▓▓▓\ /▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒\ /▒▒▒▒▓▓╫
     ╟═══════\=/═══════════╧═══════╧═══════╢
     ╫▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒\/▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓╫ 6F
     ╫▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓╫
     ╟═══════════════════════════════════════╢
     ╫▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓╫ 5F
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓╫
     ╟═══════════════════════════════════════╢
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓╫ 4F
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫
     ╟═══════════════════════════════════════╢
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫ 3F
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫
     ╟═══════════════════════════════════════╢
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫ 2F
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫
     ╟═══════════════════════════════════════╢
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▒▒▒▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫ 1F
     ╫▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓▓╫
     ╚═══════════════════════════════════════╝

▓ = (الگوی درختی) بتن سازه‌ای
▒ = (270 بازشوی منحصر به فرد) شیشه

توضیحات نما:
- الگوی ارگانیک شبیه شاخه‌های درخت
- هر بازشو یکتا است
- ضخامت متغیر بر اساس تنش
- سازه و زیبایی در یکپارچگی کامل
```

دیاگرام جریان نیرو (Force Flow Diagram)

```
نمایش ساده‌شده جریان نیرو در الگوی درختی:

          سقف
           |
       /───┼───\
      /         \
     |     ↓     |
     |   /───\   |
     |  /  ↓  \  |
    /  /   ↓   \  \
   /  |    ↓    |  \
  |   |  /─┼─\  |   |
  |  /  /  ↓  \  \  |
  | |  |   ↓   |  | |
  | | /   ↓↓   \ | |
  | / |  ↓↓↓↓  | \ |
  |   | ↓↓↓↓↓↓ |   |
  |  / ↓↓↓↓↓↓↓\  |
  | |  ↓↓↓↓↓↓↓ | |
  \ \  ↓↓↓↓↓↓↓  / /
   \ \ ↓↓↓↓↓↓↓ / /
    \ ↓↓↓↓↓↓↓↓↓ /
     ↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓↓
   ═══════════════
      پی ساختمان

جهت جریان نیرو = ↓
شاخه‌های سازه‌ای = —

بار از بالا به تدریج در شاخه‌ها جمع شده
و به سمت پایین منتقل می‌شود
```

نوآوری‌های سازه‌ای

1. **نما = سازه**: اولین بار نما به طور کامل نقش سازه اصلی را ایفا می‌کند
2. **بهینه‌سازی طبیعت‌گرا**: الگوی درختی بهینه‌ترین توزیع نیرو را دارد
3. **فضای آزاد**: 7 طبقه بدون هیچ ستون داخلی
4. **270 بازشوی منحصر به فرد**: هر کدام در محل بهینه خود
5. **زیبایی سازه‌ای**: جریان نیرو به صورت بصری نمایش داده می‌شود

جمع‌بندی و مقایسه

جدول مقایسه‌ای سیستم‌های سازه‌ای

ویژگی	سندای مدیاتک	اپرا تایچونگ	تودز اوموتساندو
مفهوم اصلی	لوله‌ها، صفحات، پوسته	غار صوتی	درخت زلکوا
سیستم باربر عمودی	13 ستون شبکه‌ای فولادی	58 دیوار منحنی بتنی	دیوار نمایی بتنی
سیستم باربر جانبی	ستون‌های شبکه‌ای	دیوارهای منحنی	دیوار نمایی
ماده اصلی	فولاد	بتن مسلح	بتن مسلح
فضای آزاد	50m × 50m	متغیر، ارگانیک	28m × 12m
ستون داخلی	ندارد	ندارد	ندارد
نوآوری اصلی	چندکارکردی ستون‌ها	سطوح دوبار منحنی	نما به عنوان سازه
پیچیدگی ساخت	متوسط	بسیار بالا	بالا
مقاومت لرزه‌ای	اثبات شده (2011)	طراحی شده	پی جداساز

دستاوردهای مشترک توبو ایتو

1. **یکپارچگی سازه و معماری**: در هر سه پروژه، سازه و معماری جدایی‌ناپذیرند
2. **حذف ستون‌های داخلی**: همه سه ساختمان فضاهای آزاد و انعطاف‌پذیر دارند
3. **نوآوری تکنولوژیک**: استفاده از فناوری‌های نوین در طراحی و ساخت
4. **الهام از طبیعت**: درخت، غار، جریان - مفاهیم طبیعی در سازه
5. **چالش‌های مهندسی**: هر پروژه مرزهای ممکن در مهندسی را جابجا کرده است

منابع

Sendai Mediatheque

- AD Classics: Sendai Mediatheque / Toyo Ito & Associates | ArchDaily
- Sendai Mediatheque - Wikipedia
- Sendai Mediatheque - Data, Photos & Plans - WikiArquitectura

Taichung Metropolitan Opera House

- | Toyo Ito's National Taichung Theater Photographed by Lucas K Doolan ArchDaily
- Taichung Metropolitan Opera House | TOYO ITO & ASSOCIATES ARCHITECTS
- Drawing for Taichung Metropolitan Opera House - Google Arts & Culture

TOD'S Omotesando Building

- TOD'S Omotesando Building | Toyo Ito & Associates, Architects - Arch2O.com
- Tod's Omotesando Building - Data, Photos & Plans - WikiArquitectura
- MY ARCHITECTURAL MOLESKINE: TOYO ITO: TOD'S OMOTESANDO

تاریخ تهیه: نوامبر 2025 **تهیه‌کننده**: تحلیل معماری و سازه‌ای آثار تویو ایتو